# 材料力学性能测试手册

龙伟民　刘胜新○主编

◎ 采用最新标准 ◎ 内容系统全面 ◎ 查阅方便快捷

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

# 材料力学性能测试手册


**主　编**　龙伟民　刘胜新

**副主编**　王万杰　张爱民

**参　编**　杨灿玲　王金荣　张金凤　陈志民　李杏娥　陈加福　夏　静
付建伟　李　响　张佳楠　吴振远　宋月鹏　肖树龙　徐丽娟
王瑞娟　刘　峰　王志刚　孟　迪　李立碑　徐　锟　陈　伟
毛　磊　张　锐　李孔斋　靳先芳　李　菁　李立程　姚　宇
李　静　柳洪洁　邓　晶　宋菊秀　李立凤　颜新奇　王　宁
胡中华　王乐军　孙华为　赵　丹　杨　娟　张冠宇　张素红
李　莎　严咏志　翟　震　潘继民　隋方飞　丛康丽　李　浩
王　波　张海连　张亚荣　张靓颖　李立里　孙志鹏　武倩倩
弓雪原　贠东海　郭　炜　高　玉　李怀武　杨　晗　李　鹏

**审　定**　汪大经



机　械　工　业　出　版　社

本书从工业生产实际出发，以现行的最新标准资料为依据，全面系统地介绍了材料的各种力学性能测试方法。其主要内容包括：材料力学性能相关知识、材料拉伸性能测定试验、材料硬度测定试验、材料冲击性能测定试验、材料扭转性能测定试验、材料剪切性能测定试验、材料压缩性能测定试验、材料弯曲性能测定试验、材料断裂性能测定试验、材料疲劳性能测定试验。本书采用最新标准资料，内容系统全面，查阅方便快捷，具有实用性、综合性、先进性、可靠性。

本书是工程设计人员、质量检测人员、材料研究及营销人员的必备工具书，也可作为相关专业在校师生的参考书。

**图书在版编目（CIP）数据**

材料力学性能测试手册/龙伟民，刘胜新主编．—北京：机械工业出版社，2014.3

ISBN 978-7-111-45532-5

Ⅰ.①材…　Ⅱ.①龙…②刘…　Ⅲ.①材料力学性质-力学性能试验-手册　Ⅳ.①TB302.3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 014161 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：陈保华　责任编辑：陈保华　版式设计：霍永明
责任校对：刘志文　封面设计：陈　沛　责任印制：刘　岚
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm·44.75 印张·2 插页·1025 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-45532-5
定价：109.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
策 划 编 辑：（010）88379734
社服务中心：（010）88361066
销 售 一 部：（010）68326294
销 售 二 部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
策划编辑：010/88379734
教 材 网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
**封面无防伪标均为盗版**

# 前　言

材料广泛应用于工业生产各领域，是现代科学技术发展和国民经济建设的重要支柱，是工业生产和生活中必不可少的物质基础。目前，国家出台了大量政策以促进材料的合理利用，加速材料的研究和开发。材料研究的开发离不开力学性能的研究，而检测方法则是非常重要且普遍应用的手段。材料的力学性能是确保产品安全和使用寿命的最主要依据，在材料选择的合理性、材料应用的优化性等方面发挥着越来越大的作用。材料力学性能的测试方法是工程技术人员必备的基础知识。为了帮助读者掌握材料各种力学性能的测试方法，从而为工程实践中的生产、设计、材料选用提供科学依据，我们编写了这本《材料力学性能测试手册》。

本书从工业生产实际出发，以现行的最新标准资料为依据，通过系统、科学地归纳整理，详细介绍了材料力学性能的测试原理及操作方法。本书主要内容包括：材料力学性能相关知识、材料拉伸性能测定试验、材料硬度测定试验、材料冲击性能测定试验、材料扭转性能测定试验、材料剪切性能测定试验、材料压缩性能测定试验、材料弯曲性能测定试验、材料断裂性能测定试验、材料疲劳性能测定试验。

为了使读者能够迅速、快捷、方便地掌握材料力学性能的各类测试方法，本书在内容编排上具有以下特点：

1）在介绍每一种材料的力学性能测试方法前，都详细地列出了相关的国家标准或行业标准的代号及名称，便于读者参考和对照。

2）通过系统、科学地归纳整理，使本书每一章节的结构均符合实际测试过程中的应用程序（包括试样制备、试验仪器设备要求、试验环境、试验详细步骤、试验过程中的操作技巧及注意事项、试验数据处理及误差的控制)，读者查阅快捷、使用方便，具有极强的实用性。

3）作者根据多年的实际工作经验，有选择地给出了部分试验的多种测试方法，包括公式法、图像法、静态法、动态法等，便于读者根据实际工作中的要求和具备的试验条件进行选择。

本书采用最新标准资料，内容系统全面，查阅方便快捷，具有实用性、综合性、先进性、可靠性。本书是工程设计人员、质量检测人员、材料研究及营销人员的必备工具书，也可作为相关专业在校师生的参考书。

本书由龙伟民、刘胜新任主编，王万杰、张爱民任副主编。具体编写情况如下：第 1 章由龙伟民编写，第 2 章由龙伟民、王万杰、杨灿玲、王金荣、张

金凤编写，第3章由刘胜新编写，第4章由张爱民、陈志民、李杏娥、陈加福、夏静、付建伟、李响、张佳楠、吴振远、宋月鹏编写，第5章由龙伟民、肖树龙、徐丽娟、王瑞娟、刘峰、王志刚、孟迪、李立碑、徐锟、陈伟编写，第6章由毛磊、张锐、李孔斋、靳先芳、李菁、李立程编写，第7章由张爱民、姚宇、李静、柳洪洁、邓晶、宋菊秀、李立凤、颜新奇、王宁、胡中华编写，第8章由王万杰、王乐军、孙华为、赵丹、杨娟、张冠宇、张素红、李莎、严咏志、翟震编写，第9章由潘继民、隋方飞、丛康丽、李浩、王波、张海连、张亚荣、张靓颖、李立里编写、第10章由王万杰、孙志鹏、武倩倩、弓雪原、贠东海、郭炜、高玉、李怀武、杨晗、李鹏编写，全书由陈永完成统稿，汪大经教授对全书进行了认真审阅。

在本书编写过程中，参考了国内外同行的大量文献资料，谨向有关人员表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，错误和纰漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编　者

# 目　　录


前言
第 1 章　材料力学性能相关知识 …… 1
1.1　材料力学性能与工程应用 ………… 1
1.2　力学性能试验的试样制备 ………… 1
1.2.1　力学性能试验的试样相关术语 ……………………………… 1
1.2.2　试料的状态 …………………… 1
1.2.3　试样类型 ……………………… 2
1.2.4　样坯切取的原则和规定 ……… 2
1.2.5　取样方法 ……………………… 3
1.3　数值修约规则……………………… 15
1.3.1　术语和定义…………………… 15
1.3.2　数值修约规则………………… 15
1.3.3　极限数值的表示和判定……… 17
1.4　试验数据的处理和误差分析……… 19
1.4.1　误差的定义和分类…………… 19
1.4.2　直接测定量的误差表示法…… 21
1.4.3　力学性能试验数据处理示例…………………………… 22
第 2 章　材料拉伸性能测定试验 …… 26
2.1　材料拉伸性能相关知识…………… 26
2.2　金属材料室温拉伸试验…………… 29
2.2.1　试样…………………………… 29
2.2.2　试验设备……………………… 37
2.2.3　试验内容及结果表示………… 39
2.3　金属材料低温拉伸试验…………… 63
2.3.1　试样…………………………… 64
2.3.2　试验设备……………………… 65
2.3.3　试验内容及结果表示………… 66
2.4　金属材料液氦拉伸试验…………… 68
2.4.1　试样…………………………… 68
2.4.2　试验设备……………………… 70
2.4.3　试验内容及结果表示………… 72
2.5　金属材料高温拉伸试验…………… 74
2.5.1　试样…………………………… 74
2.5.2　试验设备……………………… 74
2.5.3　试验内容及结果表示………… 75
2.6　金属超塑性材料拉伸试验………… 76
2.6.1　试样…………………………… 76
2.6.2　试验设备……………………… 78
2.6.3　试验内容及结果表示………… 79
2.7　金属材料单轴拉伸蠕变试验……… 81
2.7.1　试样…………………………… 81
2.7.2　试验设备……………………… 85
2.7.3　试验内容及结果表示………… 87
2.8　金属材料焊接接头拉伸试验……… 92
2.8.1　试样…………………………… 92
2.8.2　试验设备……………………… 95
2.8.3　试验内容及结果表示………… 95
2.9　金属材料焊缝十字接头和搭接接头拉伸试验……………………… 96
2.9.1　试样…………………………… 96
2.9.2　试验设备……………………… 97
2.9.3　试验内容及结果表示………… 97
2.10　焊缝及熔敷金属拉伸试验 ……… 99
2.10.1　试样 ………………………… 99
2.10.2　试验设备…………………… 100
2.10.3　试验内容及结果表示……… 100
2.11　金属材料管和环拉伸试验……… 101
2.11.1　试样………………………… 101
2.11.2　试验设备…………………… 101
2.11.3　试验内容及结果表示……… 101
2.12　非铁金属细丝拉伸试验………… 102
2.12.1　试样………………………… 102
2.12.2　试验设备…………………… 102
2.12.3　试验内容及结果表示……… 102
2.13　金属材料薄板和薄带拉伸应变硬化指数的测定…………………… 103
2.13.1　试样………………………… 104
2.13.2　试验设备…………………… 104

2.13.3　试验内容及结果表示 ……… 104
2.14　金属材料弹性模量和泊松比测定试验 ……… 106
2.14.1　静态法 ……… 106
2.14.2　动态法 ……… 113
2.15　钢丝绳破断拉伸试验 ……… 126
2.15.1　试样 ……… 126
2.15.2　试验设备 ……… 128
2.15.3　试验内容及结果表示 ……… 128
2.16　塑料拉伸试验 ……… 129
2.16.1　试样 ……… 129
2.16.2　试验设备 ……… 138
2.16.3　试验内容及结果表示 ……… 140
2.17　塑料拉伸蠕变试验 ……… 145
2.17.1　试样 ……… 145
2.17.2　试验设备 ……… 145
2.17.3　试验内容及结果表示 ……… 146
2.17.4　物理老化对聚合物蠕变的影响 ……… 148
2.18　纤维增强塑料拉伸性能试验 ……… 151
2.18.1　试样 ……… 151
2.18.2　试验设备 ……… 153
2.18.3　试验内容及结果分析 ……… 153
2.19　纤维增强热固性塑料管轴向拉伸试验 ……… 156
2.19.1　整体拉伸试验 ……… 156
2.19.2　取样拉伸试验 ……… 158
2.20　塑料焊接试样拉伸性能试验 ……… 159
2.20.1　试样 ……… 159
2.20.2　试验设备 ……… 162
2.20.3　试验内容及结果表示 ……… 162
2.21　玻璃纤维增强塑料层合板层间拉伸强度试验 ……… 163
2.21.1　试样 ……… 163
2.21.2　试样设备 ……… 165
2.21.3　试验内容及结果表示 ……… 166
2.22　热塑性塑料管材拉伸性能试验 ……… 166
2.22.1　试样 ……… 166
2.22.2　试验设备 ……… 171
2.22.3　试验内容及结果表示 ……… 171
2.23　聚乙烯管材和管件热熔对接接头拉伸强度试验 ……… 173
2.23.1　试样 ……… 173
2.23.2　试验设备 ……… 174
2.23.3　试验内容及结果表示 ……… 174
2.24　软质泡沫聚合材料拉伸试验 ……… 175
2.24.1　试样 ……… 175
2.24.2　试验设备 ……… 176
2.24.3　试验内容及结果表示 ……… 176
2.25　硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸试验 ……… 177
2.25.1　试样 ……… 177
2.25.2　试验设备 ……… 181
2.25.3　试验内容及结果表示 ……… 182
2.26　硫化橡胶高温拉伸试验 ……… 186
2.26.1　试样 ……… 186
2.26.2　试验设备 ……… 186
2.26.3　试验内容及结果表示 ……… 186
2.27　硫化橡胶拉伸耐寒系数的测定 ……… 188
2.27.1　试样 ……… 188
2.27.2　试验设备 ……… 188
2.27.3　试验内容及结果表示 ……… 189
2.28　硬质橡胶拉伸试验 ……… 190
2.28.1　试样 ……… 190
2.28.2　试验设备 ……… 190
2.28.3　试验内容及结果表示 ……… 191
2.29　橡胶或塑料涂覆织物拉伸试验 ……… 191
2.29.1　试样 ……… 192
2.29.2　试验设备 ……… 193
2.29.3　试验内容及结果表示 ……… 193
2.30　高聚物多孔弹性材料拉伸试验 ……… 195
2.30.1　试样 ……… 195
2.30.2　试验设备 ……… 196
2.30.3　试验内容及结果表示 ……… 196
2.31　土工布及其有关产品宽条拉伸试验 ……… 197

2.31.1　试样…… 197
2.31.2　试验设备…… 199
2.31.3　试验内容及结果表示…… 200
2.32　土工布接头/接缝宽条拉伸试验…… 203
2.32.1　试样…… 203
2.32.2　试验设备…… 204
2.32.3　试验内容及结果表示…… 204
2.33　织物芯输送带全厚度拉伸试验…… 205
2.33.1　试样…… 205
2.33.2　试验设备…… 207
2.33.3　试验内容及结果表示…… 208
2.34　碳纤维复丝拉伸试验…… 208
2.34.1　试样…… 209
2.34.2　试验设备…… 209
2.34.3　试验内容及结果表示…… 210
2.35　精细陶瓷室温拉伸试验…… 211
2.35.1　试样…… 211
2.35.2　试验设备…… 212
2.35.3　试验内容及结果表示…… 212
**第3章　材料硬度测定试验**…… 214
3.1　材料硬度相关知识…… 214
3.2　金属材料洛氏硬度试验…… 215
3.2.1　试样…… 215
3.2.2　试验设备…… 215
3.2.3　试验内容及结果表示…… 217
3.3　金属材料布氏硬度试验…… 222
3.3.1　试样…… 222
3.3.2　试验设备…… 223
3.3.3　试验内容及结果表示…… 224
3.4　金属材料维氏硬度试验…… 237
3.4.1　试样…… 237
3.4.2　试验设备…… 239
3.4.3　试验内容及结果表示…… 240
3.5　金属材料努氏硬度试验…… 343
3.5.1　试样…… 343
3.5.2　试验设备…… 343
3.5.3　试验内容及结果表示…… 344
3.6　金属材料肖氏硬度试验…… 372
3.6.1　试样…… 372
3.6.2　试验设备…… 372
3.6.3　试验内容及结果表示…… 373
3.7　金属材料里氏硬度试验…… 374
3.7.1　试样…… 374
3.7.2　试验设备…… 375
3.7.3　试验内容及结果表示…… 376
3.8　焊接接头硬度试验…… 394
3.8.1　试样…… 394
3.8.2　试验设备…… 394
3.8.3　试验内容及结果表示…… 394
3.9　焊缝破坏性显微硬度试验…… 400
3.9.1　试样…… 400
3.9.2　试验设备…… 400
3.9.3　试验内容及结果表示…… 400
3.10　钢铁热处理零件硬度检验通则…… 402
3.11　金属材料各种硬度的转换…… 405
3.11.1　转换硬度值的表述…… 405
3.11.2　非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏C标尺范围）…… 405
3.11.3　非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏B标尺范围）…… 406
3.11.4　镍及高镍合金硬度近似转换…… 408
3.11.5　弹壳黄铜硬度近似转换…… 411
3.11.6　奥氏体不锈钢板退火后布氏-洛氏B标尺硬度近似转换…… 412
3.11.7　奥氏体不锈钢薄板洛氏硬度近似转换…… 413
3.11.8　变形铝合金硬度近似转换…… 415
3.11.9　各种硬度间的换算关系…… 416
3.12　金属材料各种硬度与强度的转换…… 416
3.12.1　钢铁材料硬度与强度的换算关系…… 416
3.12.2　非铁金属材料硬度与强度的换算关系…… 419

3.13　塑料球压痕法硬度测试………… 419
3.13.1　试样………………………… 420
3.13.2　试验设备…………………… 420
3.13.3　试验内容及结果表示……… 420
3.14　塑料洛氏硬度测试……………… 422
3.14.1　试样………………………… 423
3.14.2　试验设备…………………… 423
3.14.3　试验内容及结果表示……… 424
3.15　塑料和硬橡胶压痕硬度试验…… 425
3.15.1　试样的制备………………… 425
3.15.2　试验设备…………………… 425
3.15.3　试验结果及内容表示……… 426
3.16　硫化橡胶或热塑性橡胶硬度试验……………………………… 427
3.16.1　橡胶国际硬度……………… 427
3.16.2　试样………………………… 429
3.16.3　试验设备…………………… 429
3.16.4　试验内容及结果表示……… 431
3.17　硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度（邵氏硬度计法）试验 … 435
3.17.1　试样………………………… 435
3.17.2　试验设备…………………… 436
3.17.3　试验内容及结果表示……… 437
3.18　摩擦材料洛氏硬度试验………… 439
3.18.1　试样………………………… 439
3.18.2　试验设备…………………… 439
3.18.3　试验内容及结果表示……… 440
3.19　烧结金属摩擦材料表观硬度试验……………………………… 441
3.19.1　试样………………………… 441
3.19.2　试验设备…………………… 441
3.19.3　试验内容及结果表示……… 441
3.20　无色光学玻璃克氏硬度试验…… 442
3.20.1　试样………………………… 442
3.20.2　试验设备…………………… 442
3.20.3　试验内容及结果表示……… 442
**第4章　材料冲击性能测定试验** … 444
4.1　材料冲击性能相关知识 ………… 444
4.2　金属材料夏比摆锤冲击试验 …… 446
4.2.1　试样 ………………………… 446
4.2.2　试验设备 …………………… 447
4.2.3　试验内容及结果表示 ……… 450
4.3　金属材料夏比冲击断口测定试验 ………………………………… 454
4.3.1　试样 ………………………… 454
4.3.2　试验设备 …………………… 454
4.3.3　试验内容及结果表示 ……… 454
4.4　钢材夏比V型缺口摆锤仪器化冲击试验 ………………………… 457
4.4.1　试样 ………………………… 457
4.4.2　试验设备 …………………… 457
4.4.3　试验内容及结果表示 ……… 459
4.5　焊接接头冲击试验 ……………… 461
4.5.1　试样 ………………………… 461
4.5.2　其他试验要求 ……………… 463
4.6　硬质合金常温冲击试验 ………… 463
4.6.1　试样 ………………………… 463
4.6.2　试验设备 …………………… 464
4.6.3　试验内容及结果表示 ……… 464
4.7　烧结金属材料冲击试验 ………… 465
4.7.1　试样 ………………………… 465
4.7.2　试验设备 …………………… 466
4.7.3　试验内容及结果表示 ……… 466
4.8　硬质塑料落锤冲击试验 ………… 467
4.8.1　试样 ………………………… 467
4.8.2　试验设备 …………………… 468
4.8.3　试验内容及结果表示 ……… 468
4.9　塑料悬臂梁冲击试验 …………… 471
4.9.1　试样 ………………………… 471
4.9.2　试验设备 …………………… 473
4.9.3　试验内容及结果表示 ……… 473
4.10　塑料冲击性能小试样试验……… 476
4.10.1　试样………………………… 476
4.10.2　试验设备…………………… 477
4.10.3　试验内容及结果表示……… 478
4.11　纤维增强塑料简支梁式冲击试验……………………………… 478
4.11.1　试样………………………… 478
4.11.2　试验设备…………………… 479
4.11.3　试验内容及结果表示……… 479

4.12　流体输送用热塑性塑料管材简支梁冲击试验 …… 480
4.12.1　试样 …… 480
4.12.2　试验设备 …… 481
4.12.3　试验内容及结果表示 …… 482
4.13　热塑性塑料管冲击试验 …… 484
4.13.1　试样 …… 484
4.13.2　试验设备 …… 484
4.13.3　试验内容及结果表示 …… 485
4.14　硬质橡胶冲击试验 …… 490
4.14.1　试样 …… 490
4.14.2　试验设备 …… 490
4.14.3　试验内容及结果表示 …… 491
4.15　不透性石墨材料冲击试验 …… 492
4.15.1　试样 …… 492
4.15.2　试验设备 …… 493
4.15.3　试验内容及结果表示 …… 494
4.16　人造金刚石冲击试验 …… 495
4.16.1　试样 …… 495
4.16.2　试验设备 …… 495
4.16.3　试验内容及结果表示 …… 496
**第5章　材料扭转性能测定试验** …… 498
5.1　金属材料室温扭转试验 …… 498
5.1.1　试样 …… 498
5.1.2　试验设备 …… 499
5.1.3　试验内容及结果表示 …… 500
5.2　金属大规格线材扭转试验 …… 504
5.2.1　试样 …… 504
5.2.2　试验设备 …… 504
5.2.3　试验内容及结果表示 …… 505
5.3　金属线材单向扭转试验 …… 506
5.3.1　试样 …… 506
5.3.2　试验设备 …… 507
5.3.3　试验内容及结果表示 …… 507
5.4　金属线材双向扭转试验 …… 508
5.4.1　试样 …… 508
5.4.2　试验设备 …… 508
5.4.3　试验内容及结果表示 …… 509
5.5　塑料扭转刚性试验 …… 509
5.5.1　试样 …… 509
5.5.2　试验设备 …… 510
5.5.3　试验内容及结果表示 …… 510
**第6章　材料剪切性能测定试验** …… 512
6.1　金属线材和铆钉剪切试验 …… 512
6.1.1　试样 …… 513
6.1.2　试验设备 …… 513
6.1.3　试验内容及结果表示 …… 517
6.2　销的剪切试验 …… 517
6.2.1　试样 …… 518
6.2.2　试验设备 …… 518
6.2.3　试验内容及结果表示 …… 518
6.3　塑料穿孔法剪切试验 …… 518
6.3.1　试样 …… 519
6.3.2　试验设备 …… 519
6.3.3　试验内容及结果表示 …… 520
6.4　纤维增强塑料层间剪切试验 …… 521
6.4.1　试样 …… 521
6.4.2　试验设备 …… 522
6.4.3　试验内容及结果表示 …… 523
6.5　纤维增强塑料冲压式剪切强度试验 …… 524
6.5.1　试样 …… 524
6.5.2　试验设备 …… 525
6.5.3　试验内容及结果表示 …… 525
6.6　硬质橡胶剪切试验 …… 527
6.6.1　试样 …… 527
6.6.2　试验设备 …… 527
6.6.3　试验内容及结果表示 …… 528
6.7　硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度试验 …… 528
6.7.1　试样 …… 528
6.7.2　试验设备 …… 529
6.7.3　试验内容及结果表示 …… 529
**第7章　材料压缩性能测定试验** …… 531
7.1　金属材料压缩性能试验 …… 531
7.1.1　试样 …… 531
7.1.2　试验设备 …… 534
7.1.3　试验内容及结果表示 …… 535
7.2　金属轴承材料压缩试验 …… 541
7.2.1　试样 …… 541

7.2.2　试验设备 ······ 541
7.2.3　试验内容及结果表示 ······ 542
7.3　塑料压缩试验 ······ 543
7.3.1　试样 ······ 543
7.3.2　试验设备 ······ 545
7.3.3　试验内容及结果表示 ······ 546
7.4　纤维增强塑料压缩试验 ······ 548
7.4.1　试样 ······ 548
7.4.2　试验设备 ······ 549
7.4.3　试验内容及结果表示 ······ 549
7.5　单向纤维增强塑料平板压缩试验 ······ 550
7.5.1　试样 ······ 550
7.5.2　试验设备 ······ 551
7.5.3　试验内容及结果表示 ······ 552
7.6　纤维增强塑料面内压缩试验 ······ 553
7.6.1　试样 ······ 553
7.6.2　试验设备 ······ 554
7.6.3　试验内容及结果表示 ······ 555
7.7　纤维增强热固性塑料管轴向压缩试验 ······ 557
7.7.1　试样 ······ 558
7.7.2　试验设备 ······ 558
7.7.3　试验内容及结果表示 ······ 559
7.8　硫化橡胶短时间静压缩试验 ······ 560
7.8.1　试样 ······ 560
7.8.2　试验设备 ······ 560
7.8.3　试验内容及结果表示 ······ 560
7.9　硫化橡胶或热塑性橡胶室温、高温和低温压缩试验 ······ 561
7.9.1　试样 ······ 562
7.9.2　试验设备 ······ 563
7.9.3　试验内容及结果表示 ······ 564
**第8章　材料弯曲性能测定试验** ······ 566
8.1　金属弯曲力学性能试验 ······ 566
8.1.1　试样 ······ 566
8.1.2　试验设备 ······ 568
8.1.3　试验内容及结果表示 ······ 570
8.2　金属材料弯曲试验 ······ 574
8.2.1　试样 ······ 575
8.2.2　试验设备 ······ 576
8.2.3　试验内容及结果表示 ······ 577
8.3　金属线材反复弯曲试验 ······ 579
8.3.1　试样 ······ 579
8.3.2　试验设备 ······ 579
8.3.3　试验内容及结果表示 ······ 580
8.4　钢筋混凝土用钢筋弯曲和反向弯曲试验 ······ 581
8.4.1　试样 ······ 581
8.4.2　试验设备 ······ 581
8.4.3　试验内容及结果表示 ······ 583
8.5　热双金属热弯曲试验 ······ 583
8.5.1　试样 ······ 583
8.5.2　试验设备 ······ 584
8.5.3　试验内容及结果表示 ······ 586
8.6　热双金属横向弯曲试验 ······ 590
8.6.1　试样 ······ 590
8.6.2　试验设备 ······ 591
8.6.3　试验内容及结果表示 ······ 591
8.7　焊接接头弯曲试验 ······ 592
8.7.1　试样 ······ 592
8.7.2　试验设备 ······ 596
8.7.3　试验内容及结果表示 ······ 596
8.8　塑料弯曲试验 ······ 599
8.8.1　试样 ······ 599
8.8.2　试验设备 ······ 601
8.8.3　试验内容及结果表示 ······ 601
8.9　纤维增强塑料弯曲试验 ······ 603
8.9.1　试样 ······ 604
8.9.2　试验设备 ······ 604
8.9.3　试验内容及结果表示 ······ 605
8.10　塑料焊接试样弯曲试验 ······ 607
8.10.1　试样 ······ 607
8.10.2　试验设备 ······ 609
8.10.3　试验内容及结果表示 ······ 610
8.11　硬质泡沫塑料弯曲强度和表观弯曲弹性模量测定试验 ······ 611
8.11.1　试样 ······ 611
8.11.2　试验设备 ······ 612
8.11.3　试验内容及结果表示 ······ 612

8.12　硬质橡胶弯曲试验………………… 614
8.12.1　试样………………………… 614
8.12.2　试验设备…………………… 614
8.12.3　试验内容及结果表示……… 615
8.13　不透性石墨材料弯曲试验……… 616
8.13.1　试样………………………… 616
8.13.2　试验设备…………………… 617
8.13.3　试验内容及结果表示……… 617
**第9章　材料断裂性能测定试验** … 619
9.1　金属材料表面裂纹拉伸试样断裂韧度试验 ………………………… 619
9.1.1　试样 ………………………… 619
9.1.2　试验设备 …………………… 620
9.1.3　试验内容及结果表示 ……… 620
9.2　金属材料平面应变断裂韧度试验 ……………………………… 623
9.2.1　试样 ………………………… 623
9.2.2　试验设备 …………………… 624
9.2.3　试验内容及结果表示 ……… 627
9.3　铁素体钢平面应变止裂韧度试验 ……………………………… 630
9.3.1　试样 ………………………… 630
9.3.2　试验设备 …………………… 631
9.3.3　试验内容及结果表示 ……… 633
9.4　金属材料准静态断裂韧度试验 … 638
9.4.1　试样 ………………………… 638
9.4.2　试验设备 …………………… 642
9.4.3　试验内容及结果表示 ……… 644
9.5　金属材料焊接接头准静态断裂韧度试验 ………………………… 650
9.5.1　试样 ………………………… 650
9.5.2　试验设备 …………………… 657
9.5.3　试验内容及结果表示 ……… 657
9.6　硬质合金横向断裂强度试验 …… 661
9.6.1　试样 ………………………… 661
9.6.2　试验设备 …………………… 662
9.6.3　试验内容及结果表示 ……… 662
9.7　烧结金属材料横向断裂强度试验 ……………………………… 663
9.7.1　试样 ………………………… 663
9.7.2　试验设备 …………………… 663
9.7.3　试验内容及结果表示 ……… 663
**第10章　材料疲劳性能测定试验** ……………………………… 665
10.1　金属材料扭应力疲劳试验……… 665
10.1.1　试样………………………… 665
10.1.2　试验设备…………………… 666
10.1.3　试验内容及结果表示……… 667
10.2　金属材料滚动接触疲劳试验…… 669
10.2.1　试样………………………… 669
10.2.2　试验设备…………………… 673
10.2.3　试验内容及结果表示……… 673
10.3　金属材料旋转弯曲疲劳试验…… 677
10.3.1　试样………………………… 678
10.3.2　试验设备…………………… 682
10.3.3　试验内容及结果表示……… 683
10.4　金属材料疲劳裂纹扩展速率试验……………………………… 685
10.4.1　试样………………………… 685
10.4.2　试验设备…………………… 689
10.4.3　试验内容及结果表示……… 690
10.5　金属材料轴向等幅低循环疲劳试验……………………………… 692
10.5.1　试样………………………… 694
10.5.2　试验设备…………………… 696
10.5.3　试验内容及结果表示……… 697
10.6　软质泡沫材料疲劳试验………… 699
10.6.1　试样………………………… 699
10.6.2　试验设备…………………… 700
10.6.3　试验内容及结果表示……… 701
**参考文献** ………………………………… 703

# 第 1 章　材料力学性能相关知识

## 1.1　材料力学性能与工程应用

材料的力学性能是指材料在不同环境（如温度、介质、湿度）下，承受各种外加载荷（拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等）时所表现出的力学特征。近年来，材料的力学性能已逐渐形成一门新的学科。

材料力学性能是一门试验学科，它的基础就是对材料的各种力学性能指标进行测定，即力学性能试验。进行力学性能试验的目的是：

（1）研究材料在给定条件下的力学性能变化规律　材料在内部因素和外部条件的作用下，其强度和变形的规律需要通过试验来测定。掌握这种规律，便可应用于设计、选材以及研究工作中，为结构件和零部件的设计提供材料的力学性能数据。

（2）为材料的成分选择和热处理工艺的确定提供依据　根据材料制成的零部件的服役条件，确定考核材料性能的力学性能指标，然后以此为依据来调整材料的成分和选择热处理工艺，以便得到强度、塑性和韧性相配合的、综合性能最佳的材料和工艺。

## 1.2　力学性能试验的试样制备

### 1.2.1　力学性能试验的试样相关术语

（1）试验单元　根据产品标准或合同的要求，以在抽样产品上所进行的试验为依据，一次接收或拒收产品的数量或质量，称为试验单元，如图 1-1 所示。

（2）抽样产品　检验、试验时，在试验单元中抽取的部分（如一块板），称为抽样产品，如图 1-1 所示。

（3）试料　为了制备一个或几个试样，从抽样产品中切取足够量的材料，称为试料（在某些情况下，试料就是抽样产品），如图 1-1 所示。

（4）样坯　为了制备试样，经过机械处理或所需热处理后的试料，称为样坯，如图 1-1 所示。

（5）试样　经机加工或未经机加工后，具有合格尺寸且满足试验要求状态的样坯，称为试样（在某些状态下，试样可以是试料，也可以是样坯），如图 1-1 所示。

### 1.2.2　试料的状态

取样的状态分为交货状态和标准状态。

**1. 交货状态**

在交货状态下取样时，可从以下两种条件中选择：

1）产品成形和热处理完成之后取样。

2）如在热处理之前取样，试料应在与交货产品相同的条件下进行热处理。当需要矫直试料时，应在冷状态下进行。

**2. 标准状态**

在标准状态下取样时，应按产品标准或订货单规定的生产阶段取样。如果必须对试料矫直，则可在热处理之前进行热加工或冷加工。热加工的温度应低于最终热处理温度。

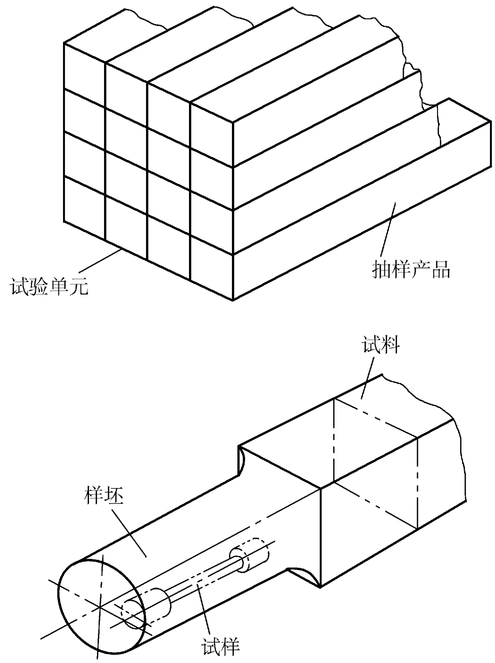


图 1-1　试验单元、抽样产品、试料、样坯及试样

## 1. 2. 3　试样类型

1）从原材料上直接切取样坯，然后加工成标准规定的标准试样。例如型材、棒材、板材、管材和线材等，就是根据国家标准（或其他相关标准），在一定的部位取出一定尺寸的样坯，加工成所需的拉伸、弯曲和冲击等试验所需的试样。

2）以产品（结构或零部件）的一定部位（一般是最薄弱、最危险的部位）切取样坯，加工成一定尺寸的试样，进行相应的力学性能试验。它与试验应力分析相配合，可进一步校正设计计算的正确性，也可检验产品热处理及加工工艺等是否符合预期的要求。这在失效分析中具有重要作用。

3）把零部件或结构作为样品，直接进行力学性能试验。例如弹簧、螺栓、齿轮、轴承、轴和连杆等，又如一台发动机、一辆汽车或一架飞机等，都可作为一个试样，用来作静载、动载等各项试验，以便测定其强度和变形等力学性能。这种试验代价比较大，但其试验结果反映了材料、热处理、机加工和连接配合等综合的效果，因此具有代表性。

## 1. 2. 4　样坯切取的原则和规定

**1. 样坯切取的原则**

1）取样部位要有代表性，对原材料而言，由于型材、棒材、板材、管材等各部位的性能不尽相同，因此应在特定的部位取样，才有代表性和可比性。对实际零部件而言，具有代表性的一般是最薄弱、最危险部位。代表性的另一含义是，切取何种试样样坯，应与零部件的服役条件相一致，否则就失去了意义。

2）样坯切取的部位、方向、尺寸和数值均应按有关标准、技术条件或技术协议进行。

**2. 样坯切取的相关规定**

按照 GB/T 2975—1998《钢及钢产品　力学性能试验取样位置及试样制备》的要

求，样坯切取的规定是：

1）样坯应在外观及尺寸合格的钢材上切取。

2）取样时，应对抽样产品、试料、样坯和试样作出标记，以保证始终能识别取样的位置及方向。

3）切取样坯时，应防止受热、加工硬化及变形影响其力学及工艺性能。样坯的切取方法一般有火焰切割和冷剪两种。用火焰切割法切取样坯时，材料在火焰喷射下熔化，从而使样坯从整体中分离出来。在熔化区附近，材料所经受的局部高温将会引起材料性能的很大变化，因此从样坯切割线至试样边缘必须留有足够的余量。在试样加工时，把这一部分余量去掉，从而不影响试样的性能。这一余量的规定为：一般应不小于钢材的厚度或直径，但最小不得小于 20mm。对厚度或直径大于 60mm 的钢材，其切割余量可适当减小。用冷剪法切取样坯时，在冷剪边缘会产生塑性变形，厚度或直径越大，塑性变形的范围也越大，因此，必须留下足够的剪割余量。加工余量的规定如表 1-1所示。

**表 1-1　加工余量的规定**

| 钢材的厚度或直径/mm | 加工余量/mm | 钢材的厚度或直径/mm | 加工余量/mm |
|---|---|---|---|
| ≤4 | 4 | >20～35 | 15 |
| >4～10 | 厚度或直径 | >35 | 20 |
| >10～20 | 10 | | |

## 1.2.5　取样方法

### 1. 型钢的取样

1）在型钢腿部宽度方向切取样坯的位置如图 1-2 所示。

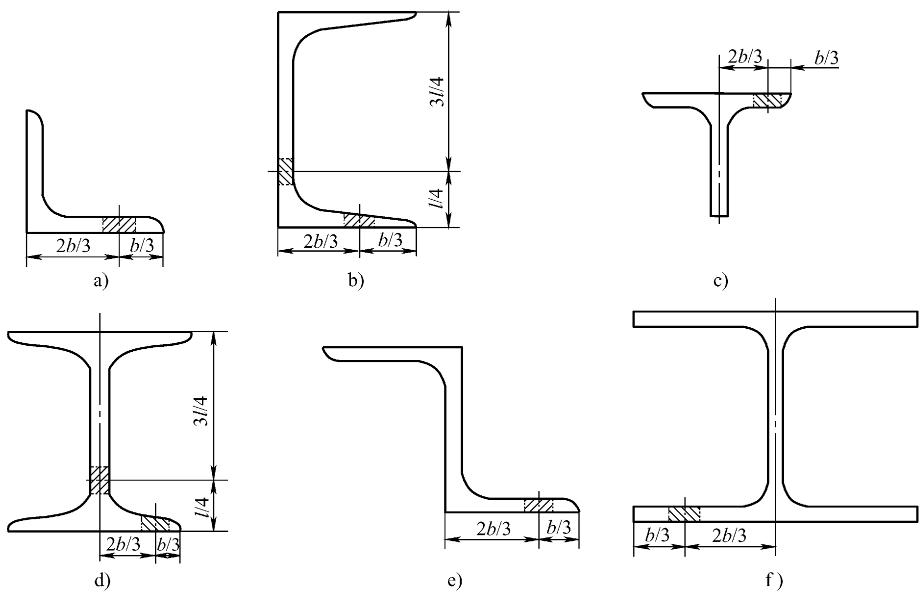



图 1-2　在型钢腿部宽度方向切取样坯的位置

a）角钢　b）槽钢　c）T 形钢　d）斜工字钢　e）Z 形钢　f）平工字钢

2）在型钢腿部厚度方向切取拉伸样坯的位置如图 1-3 所示。

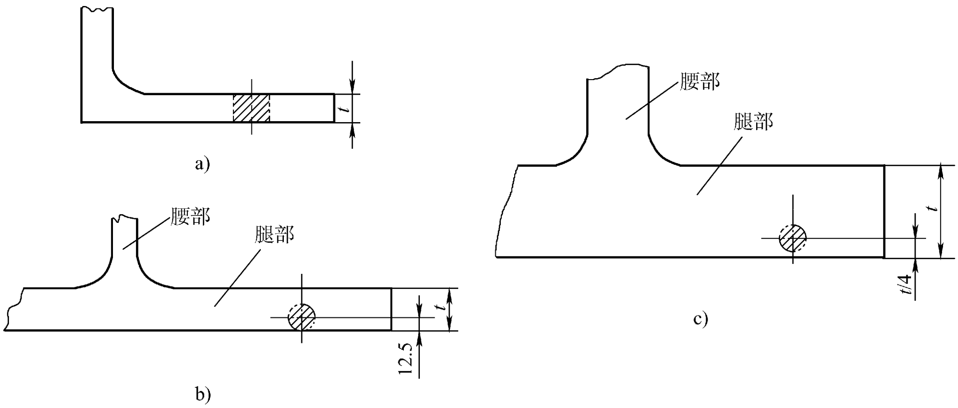



图 1-3　在型钢腿部厚度方向切取拉伸样坯的位置

a）$t \leqslant 50$mm　b）$t \leqslant 50$mm 圆形试样　c）$t > 50$mm 圆形试样

3）若型钢尺寸不能满足要求，可将取样位置向中部位移。对于腿部有斜度的型钢，可在腰部 1/4 处取样，也可从腿部取样进行机加工。

4）对于腿部长度不相等的角钢，可从任一腿部取样。

5）对于腿部厚度不大于 50mm 的型钢，当机加工和试验机能力允许时，应按图 1-3a切取拉伸样坯。

6）对于腿部厚度不大于 50mm 的型钢，当切取圆形横截面拉伸样坯时，应按图 1-3b切取。

7）对于腿部厚度大于 50mm 的型钢，当切取圆形横截面样坯时，应按图 1-3c 切取。

8）在型钢腿部厚度方向切取冲击样坯的位置如图 1-4 所示。

9）对于扁钢的取样，规定在扁钢端部沿轧制方向、距边缘宽度 1/3 处切取拉伸、弯曲和冲击的样坯，如图 1-5 所示。

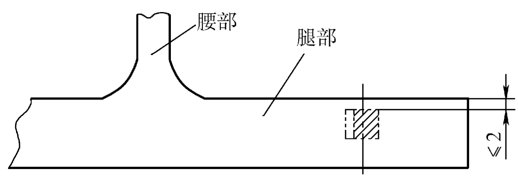



图 1-4　在型钢腿部厚度方向切取冲击样坯的位置

当扁钢的厚度 $t \leqslant 25$mm，取下的样坯应加工成保留原轧制面的矩形截面拉伸试样。如果试验机吨位不能满足要求，则应加工成保留一个轧制面的矩形拉伸试样。

当扁钢的厚度 $t > 25$mm，可根据钢材厚度加工成圆形截面的比例试样。试样的中心线应尽可能接近钢材表面，即在头部保留不太显著的氧化皮。

10）切取冲击试样的样坯时，应在一侧保留原轧制面。冲击试样的缺口轴线应垂直于该轧制面，如图 1-6 所示。

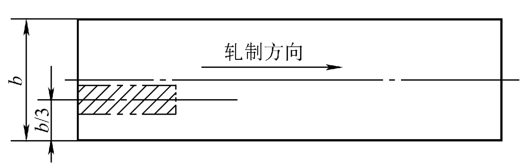



图 1-5　扁钢取样部位

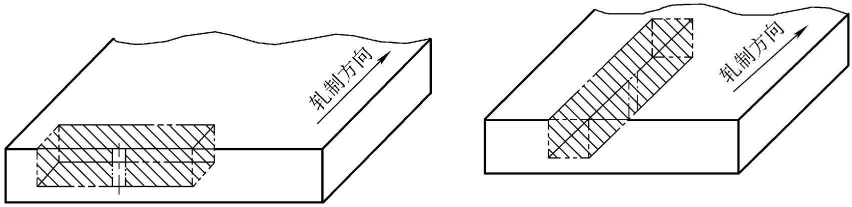



图 1-6　冲击试样缺口取向

11）当扁钢的厚度 $t \leqslant 30$mm 时，弯曲样坯的厚度应为钢材厚度；当扁钢厚度 $t > 30$mm 时，样坯应加工成厚度为 20mm 的试样，并保留一个轧制面。

**2. 条钢的取样**

1）在圆钢上选取拉伸样坯的位置如图 1-7 所示，当机加工和试验机能力允许时，按图 1-7a 取样。

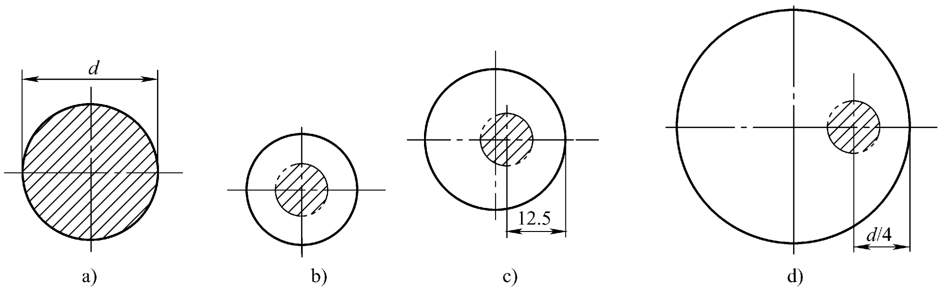



图 1-7　在圆钢上选取拉伸样坯的位置

a）全横截面　b）$d \leqslant 25$mm　c）$25\text{mm} < d \leqslant 50$mm　d）$d > 50$mm

2）在圆钢上选取冲击样坯的位置如图 1-8 所示。

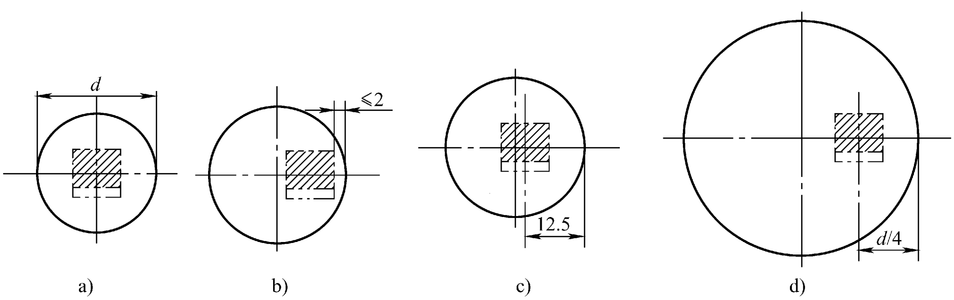



图 1-8　在圆钢上选取冲击样坯的位置

a）$d \leqslant 25$mm　b）$25\text{mm} < d \leqslant 50$mm Ⅰ类　c）$25\text{mm} < d \leqslant 50$mm Ⅱ类　d）$d > 50$mm

3）在六角钢上选取拉伸样坯的位置如图 1-9 所示，当机加工和试验机能力允许时，按图 1-9a 取样。

4）在六角钢上选取冲击样坯的位置如图 1-10 所示。

5）在矩形截面条钢上切取拉伸样坯的位置如图 1-11 所示，当机加工和试验机能力允许时，按图 1-11a 取样。

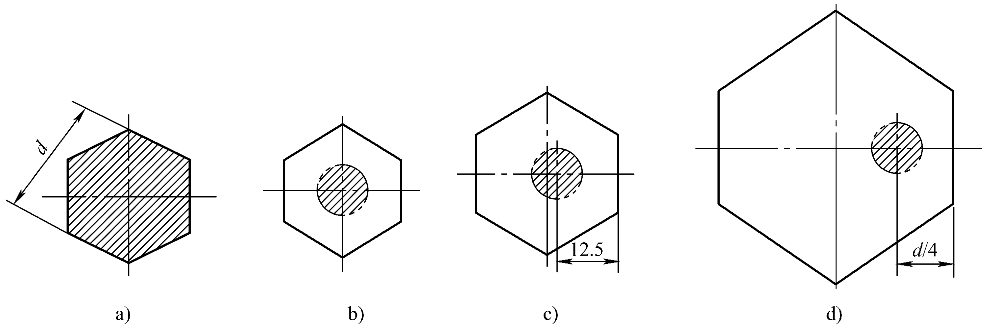



图 1-9　在六角钢上选取拉伸样坯的位置

a）全横截面　b）$d$≤25mm　c）25mm < $d$≤50mm　d）$d$ > 50mm

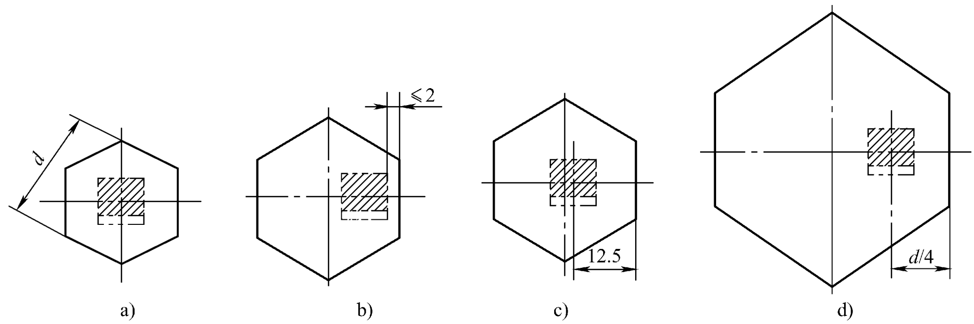



图 1-10　在六角钢上选取冲击样坯的位置

a）$d$≤25mm　b）25mm < $d$≤50mm Ⅰ类　c）25mm < $d$≤50mm Ⅱ类　d）$d$ > 50mm

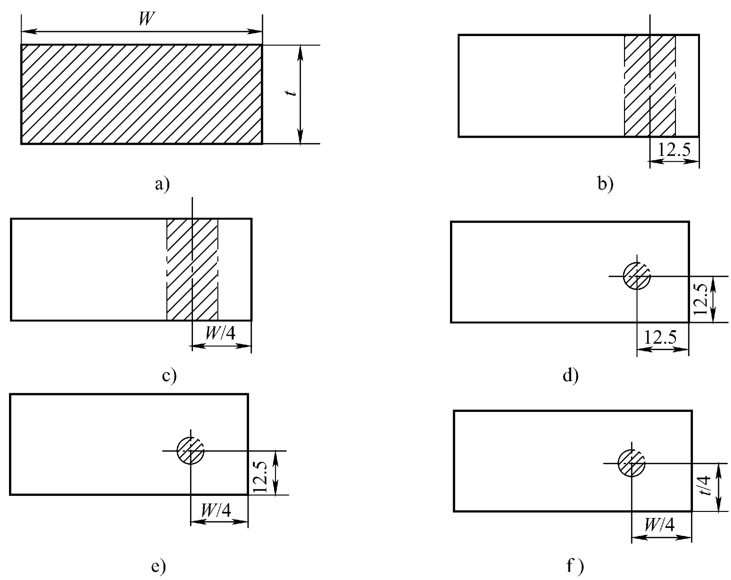



图 1-11　在矩形截面条钢上切取拉伸样坯的位置

a）全横截面　b）$W$≤50mm　c）$W$ > 50mm

d）$W$≤50mm 且 $t$≤50mm　e）$W$ > 50mm 且 $t$≤50mm　f）$W$ > 50mm 且 $t$ > 50mm

6）在矩形截面条钢上切取冲击样坯的位置如图 1-12 所示。

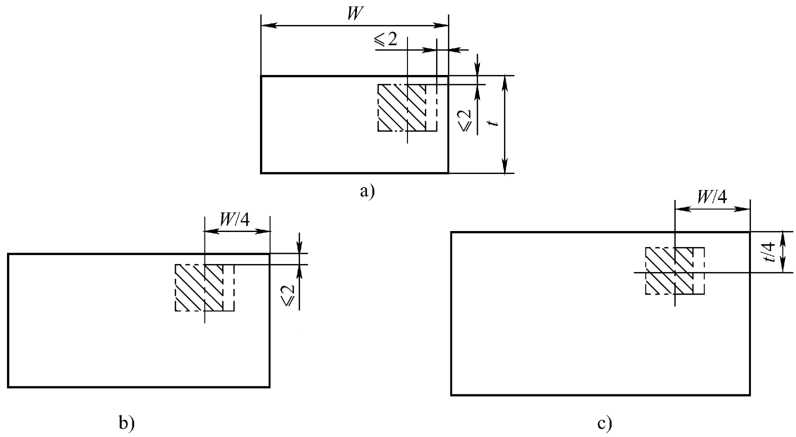



图 1-12　在矩形截面条钢上切取冲击样坯的位置

a）12mm≤$W$≤50mm 且 $t$≤50mm　b）$W$>50mm 且 $t$≤50mm　c）$W$>50mm 且 $t$≤50mm

**3. 钢板的取样**

1）应在钢板宽度 1/4 处切取拉伸样坯，如图 1-13 所示，当机加工和试验机能力允许时，应按图 1-13a 取样。对于纵轧钢板，当产品标准没有规定取样方向时，应在钢板宽度 1/4 处切取横向样坯。若钢板宽度不足，样坯中心可以内移。

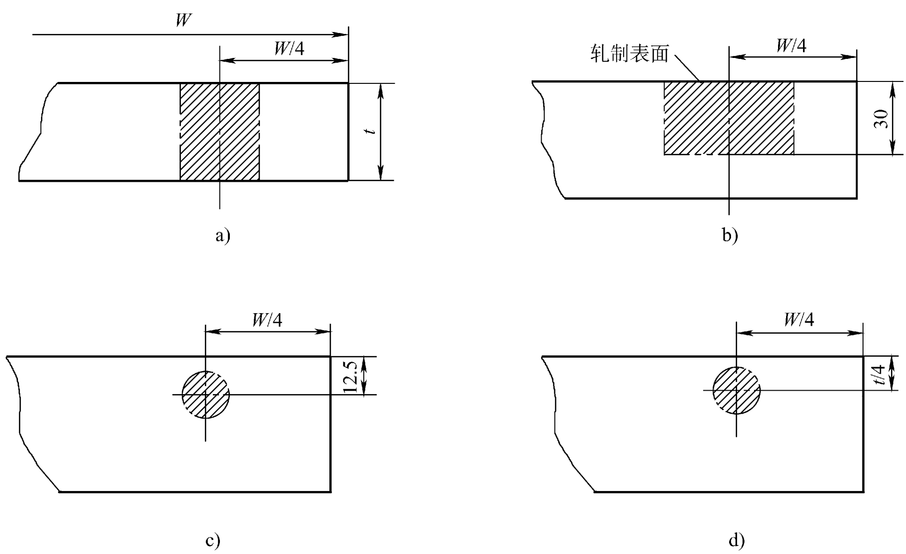



图 1-13　在钢板上截取拉伸样坯的位置

a）全厚度　b）$t$>30mm　c）25mm<$t$<50mm　d）$t$≥50mm

2）在钢板厚度方向切取冲击样坯的位置如图 1-14 所示。

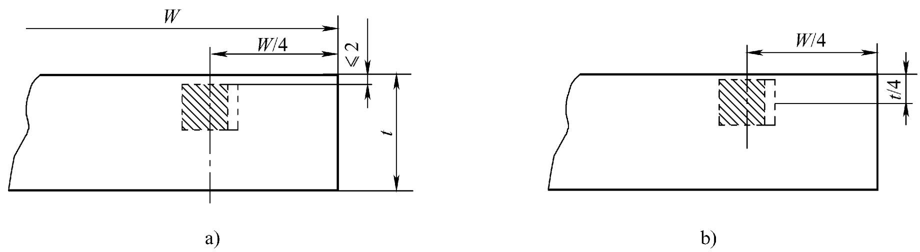



图 1-14　在钢板上切取冲击样坯的位置

a）全部 $t$ 值　b）$t>40$mm

**4. 管材的取样**

1）在钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置如图 1-15 所示，当机加工和试验机能力允许时，应按图 1-15a 取样。

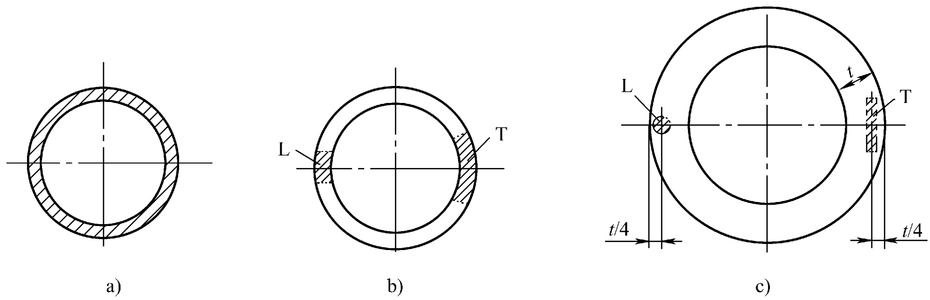



图 1-15　在钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置

a）全横截面　b）矩形横截面　c）圆形横截面

注：L 表示纵向试样（试样纵向轴线与主加工方向平行），T 表示横向试样（试样纵向轴线与主加工方向垂直），以下同。

2）在钢管上切取冲击样坯的位置如图 1-16 所示。

3）在方形钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置如图 1-17 所示。

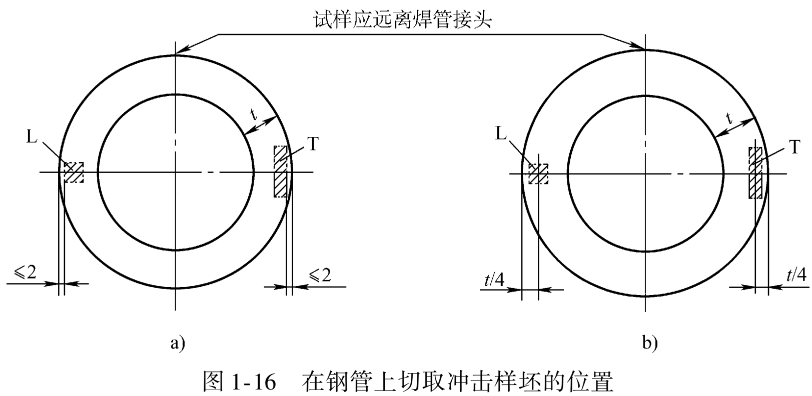



图 1-16　在钢管上切取冲击样坯的位置

a）$t\leqslant40$mm　b）$t>40$mm

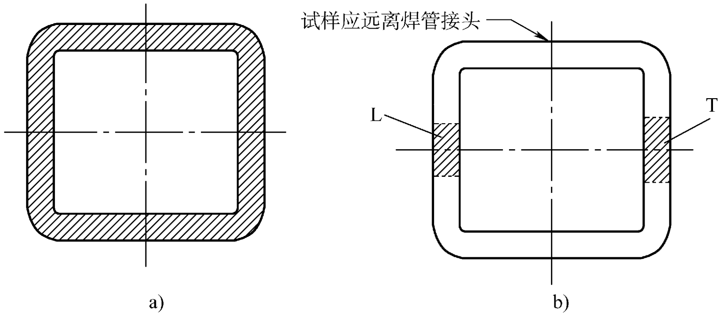



图 1-17　在方形钢管上切取拉伸及弯曲样坯的位置
a）全横截面　b）矩形横截面

4）在方形钢管上切取冲击样坯的位置如图 1-18 所示。

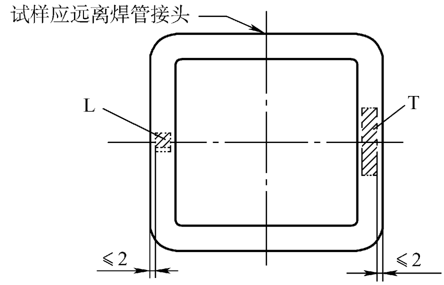



图 1-18　在方形钢管上切取冲击样坯的位置

**5. 焊接接头的取样**

（1）焊接试板的制备　试板是模拟产品或构件的制造技术条件而焊制成的试验板或管接头。力学试验用的试样样坯就是从专门焊接的试板或管接头中截取，在特殊情况下也可从结构件上直接截取。焊接前试板的截取方位应符合相应的产品制造技术条件或冶金产品技术条件的规定。试板用母材、焊接材料、焊接条件及焊后热处理均应与相应产品或构件的制造条件相同。对于熔焊和压焊的试板，其焊前厚度及每侧宽度应符合表 1-2 的规定。

**表 1-2　试板厚度及每侧宽度**　　（单位：mm）

| 试板厚度 | 试板每侧宽度 | 试板厚度 | 试板每侧宽度 |
|---|---|---|---|
| ≤10 | ≥80 | >24～50 | ≥150 |
| >10～24 | ≥100 | >50 | ≥200 |

试板长度应根据样坯尺寸、数量、切口宽度、加工余量及两端不能利用的区段（如电弧焊的引弧端和收弧端）予以综合考虑。不能利用的区段长度应根据试板厚度和焊接工艺加以考虑，但不得小于 25mm。从结构件或试板上截取的样坯，一般都不允许矫直。如果焊后需正火或调质，则允许在热处理前进行矫直；如果焊后不进行热处理，则允许将已制备的试样在非受试验部分矫直。

试板挠度 $f$（见图 1-19），在 200mm 长度内不应超过板（壁）厚的 10%，且不得大于 4mm。对接接头平板错位 $h$（见图 1-20），不应超过板厚的 15%，且不得大于 4mm。

试板可用任意方法打上标记，但应在受试部分之外。

（2）样坯的截取　从试板中截取样坯时，一般采用机械切削方法，也可用剪床、等离子或火焰切割的方法截取，但均应考虑其加工余量，保证受试部分金属性能不受影响。从结构件中截取的试板尺寸应根据试样数量和切口宽度来决定。如果直接从结构件

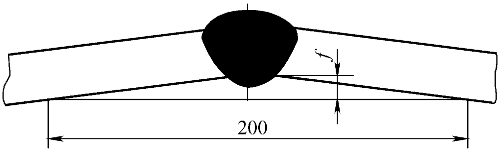



图 1-19　焊接试板挠度 $f$ 示意图

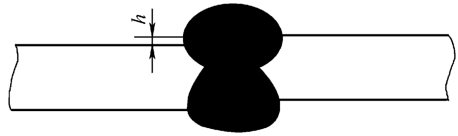
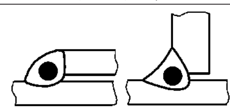
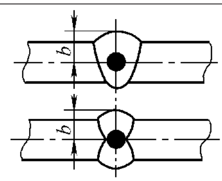
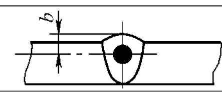
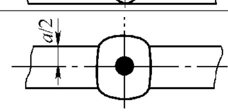
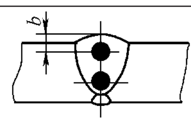
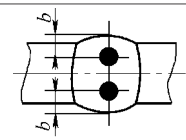
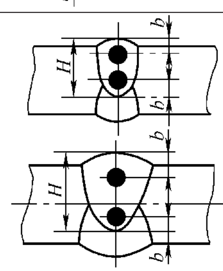



图 1-20　对接接头平板错位 $h$ 示意图

中用火焰切割截取样坯时，除考虑加工余量外，还需保证试样上不得留有火焰切割的热影响区。各种试验的样坯截取方位应按下列规定进行：

1）焊缝金属拉伸样坯截取位置如表 1-3 所示。多层焊缝的样坯截取方位如无特殊要求时，应尽量靠近焊缝表层截取。

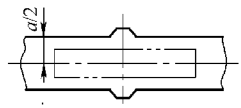
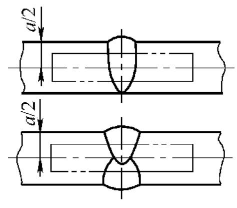
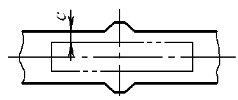
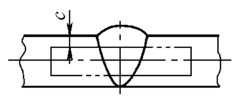
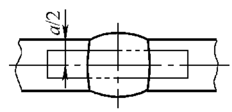
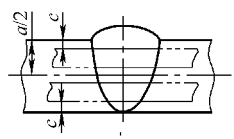
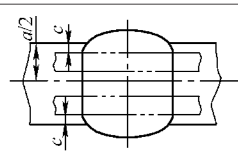
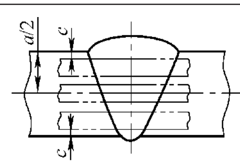
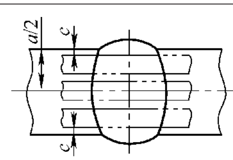
**表 1-3　焊缝金属拉伸样坯截取位置**

| 试板厚度/mm | 焊接方法 | 样 坯 方 位 | 说　　明 |
|---|---|---|---|
| 焊缝直角边大于 6×6 | 电弧焊 |  | 样坯位于焊缝中心 |
| 5～16 | 气焊或电弧焊 |   | $b$ 不大于 $\frac{D}{2}+2\text{mm}$ |
| >16～36 | 气焊或电弧焊 |   | $b$ 不大于 $\frac{D}{2}+2\text{mm}$ |
| | 电渣焊 |   | |
| >36～60 | 电弧焊 |   | $b$ 不大于 $\frac{D}{2}+2\text{mm}$ |
| | 电渣焊 |   | |
| $H$>36～60 | 电弧焊 |   | 1) $b$ 不大于 $\frac{D}{2}+2\text{mm}$<br>2) 样坯均从后焊一侧截取 |

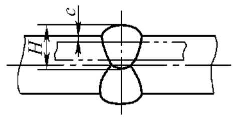
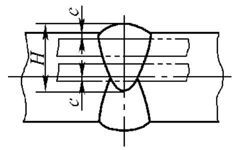
注：$a$ 是试板厚度，单位为 mm；$b$ 是从焊缝表面至样坯中心距离，单位为 mm；$D$ 是试样端头直径，单位为 mm；$H$ 是焊缝熔深，单位为 mm。

2）焊接接头冲击样坯截取位置如表 1-4 所示。

**表 1-4　焊接接头冲击样坯截取位置**

| 试板厚度/mm | 焊接方法 | 样 坯 方 位 | 说　　明 |
|---|---|---|---|
| 5 ~ 16 | 压焊 |  | |
| | 电弧焊或气焊 |  | |
| >16 ~ 40 | 压焊 |  | $c$ = 1 ~ 3mm |
| | 电弧焊 |  | |
| | 电渣焊 |  | |
| >40 ~ 60 | 电弧焊 |  | $c$ = 1 ~ 3mm |
| | 电渣焊 |  | $c \geqslant 8$mm |
| >60 ~ 100 | 电弧焊 |  | $c$ = 1 ~ 3mm |
| | 电渣焊 |  | $c \geqslant 8$mm |

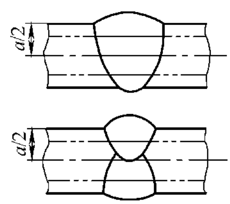
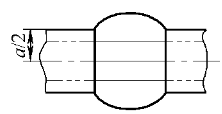
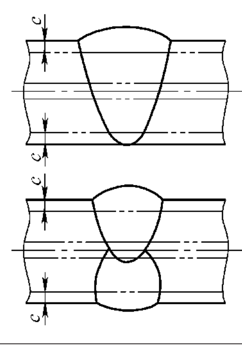
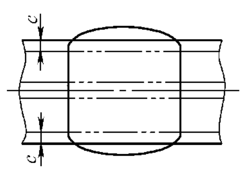
（续）

| 试板厚度/mm | 焊接方法 | 样坯方位 | 说　明 |
| --- | --- | --- | --- |
| $H=18\sim40$ | 电弧焊 |  | 1) $c=1\sim3$mm<br>2)样坯均从后焊一侧截取 |
| $H>40\sim60$ | |  | |

注：$a$ 是试板厚度，单位为 mm；$c$ 是试样表面至样坯表面的距离，单位为 mm；$H$ 是焊缝熔深，单位为 mm。

3）焊接接头的拉伸、弯曲、疲劳样坯截取位置如表 1-5 所示。

**表 1-5　焊接接头的拉伸、弯曲、疲劳样坯截取位置**

| 试板厚度/mm | 焊接方法 | 样坯方位 | 说　明 |
| --- | --- | --- | --- |
| ≤36 | 电弧焊 |  | |
| | 电渣焊 |  | |
| >36～100 | 电弧焊 |  | $c=1\sim3$mm |
| | 电渣焊 |  | $c\geqslant8$mm |

注：$a$ 是试板厚度，单位为 mm；$c$ 是试样表面至样坯表面的距离，单位为 mm。

4）点焊接头抗剪样坯截取位置如图 1-21 所示。

5）接头拉伸和焊缝金属拉伸试样均不得少于两个，接头冲击和冷作时效敏感性冲击试样均不少于三个；点焊接头抗剪试样不少于五个；疲劳试样不少于六个；压扁试样不少于一个。

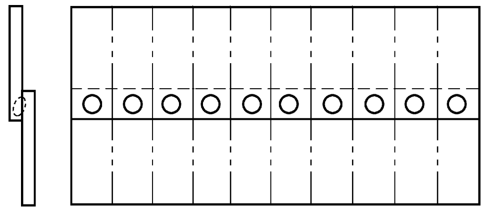


图 1-21　点焊接头抗剪样坯截取位置

6）样坯截取位置根据焊缝外形及无损探伤结果，在试板的有效利用长度内作适当分布。样坯从试板或管接头上的截取位置如图 1-22 ~ 图 1-24 所示。

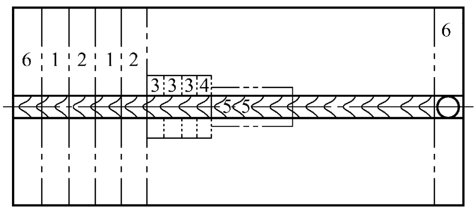



图 1-22　熔焊试板样坯截取位置

1—拉伸　2—弯曲　3—冲击

4—硬度　5—焊接拉伸　6—舍弃

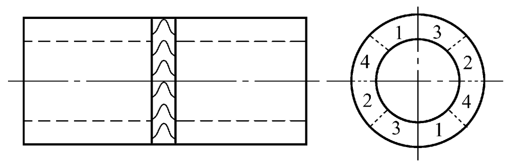
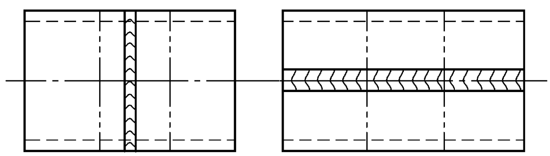



图 1-23　熔焊管接头样坯截取位置

1—拉伸　2—弯曲　3—冲击　4—硬度

### 6. 灰铸铁的取样

灰铸铁件的力学性能应分批检验。试样用同一炉次、同一牌号的铁液在干型内浇铸。每组至少浇三个试样，采用立浇底注。



a)　b)

图 1-24　熔焊管接头压扁样坯截取位置

a）环缝压扁　b）纵缝压扁

1）需要进行热处理的铸件，其试样应与铸件一起进行热处理。试样放置位置应考虑到与铸件热处理条件一致，但进行消除应力的时效处理时，试样可不预热处理。

2）进行拉伸和弯曲试验时，一组用三个铸件试样。一般先进行弯曲试验，若三根中有两根合格，即认为该批铸件为合格，若弯曲性能不合格，则进行拉伸试验，同样若三根中有两根合格，则认为拉伸性能合格，一般拉伸试样用弯曲试验后的半段加工而成。

3）灰铸铁的弯曲试样一般取毛坯试样，不进行加工，其尺寸如表 1-6 所示，弯曲试验条件如表 1-7 所示。

**表 1-6　灰铸铁弯曲试样尺寸**　（单位：mm）

| 试样直径 $d$ | 直径允许偏差 | | 长度 $L$ | 最大与最小直径偏差 |
|---|---|---|---|---|
| | 毛坯试样 | 加工试样 | | |
| 13 | ±1.0 | ±0.1 | 160 | 0.4 |
| 20 | ±1.0 | ±0.2 | 240 | 0.6 |
| 30 | ±1.0 | ±0.2 | 340 | 0.9 |
| 45 | ±1.4 | ±0.2 | 500 | 1.3 |

**表 1-7　弯曲试验条件**

| 试样直径 $d$/mm | 支承跨距 $l_0$/mm | 测量精度 | | | 初载荷/N |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 直径/mm | 载荷/N | 挠度/mm | |
| 13 | 130 | 0. 1 | 49 | 0. 1 | 59 ~ 98 |
| 20 | 200 | 0. 1 | 98 | 0. 1 | 196 ~ 294 |
| 30 | 300 | 0. 1 | 196 | 0. 2 | 294 ~ 490 |
| 45 | 450 | 0. 2 | 490 | 0. 3 | 294 ~ 490 |

4）灰铸铁的拉伸试样如图 1-25 所示，其尺寸规定如表 1-8 所示。

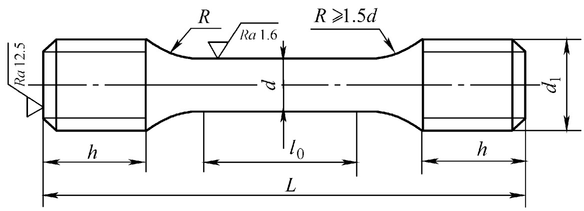



图 1-25　灰铸铁的拉伸试样

**表 1-8　灰铸铁拉伸试样尺寸**　（单位：mm）

| 毛坯直径 | 试样直径 $d$ | 平行部分长度 $l_0$ | 螺纹直径 $d_1$ | 端部长度 $h$ | 总长 $L$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 8 ±0. 05 | 8 | M12 | 16 | 54 ~ 56 |
| 20 | 13 ±0. 05 | 13 | M18 | 24 | 82 ~ 87 |
| 30 | 20 ±0. 1 | 20 | M28 | 36 | 126 ~ 132 |
| 45 | 30 ±0. 2 | 30 | M42 | 50 | 174 ~ 180 |

**7. 铸钢的取样**

铸钢件力学性能试验用的毛坯试样应单独浇铸，毛坯主要尺寸和试样切取位置应符合图 1-26 的要求。

毛坯试样要随所代表的铸件一起热处理。不同熔炼炉次但同牌号的一批铸件同炉热处理时，应按每一熔炼炉次检验；同一熔炼炉次的同一批铸件，在固定的热处理工艺条件和稳定热处理质量条件下，分炉热处理时允许抽检。

每次抽检一个拉伸试样和两个冲击试样。如果某项目有一个试样的性能不合格，则加倍取样，如果其中再有一个不合格，则应将所代表的铸件连同备用试样再次进行热处理，然后进行力学性能复验。

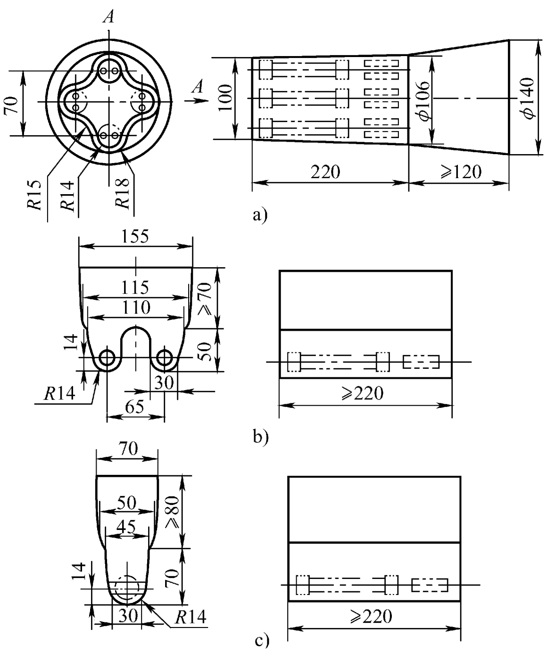



图 1-26　铸钢的三种试棒

a）梅花试棒　b）基尔试棒　c）楔形试棒

**8. 球墨铸铁的取样**

1）球墨铸铁的力学性能试验采用梅花试样、基尔试样和楔形试棒（即Y型试棒）。为了进行疲劳试验，三种试棒的长度应不小于230mm，一般取250～260mm。

2）试棒应单独浇出，在干砂型或湿砂型中均可浇铸。

3）如果需进行冲击试验，则牌号为QT400-10及QT450-5的球墨铸铁可用10mm×10mm×55mm的无切口试样，其余牌号均用20mm×20mm×120mm的无切口试样。

4）浇铸时，每批铁液浇一组试棒。每批系指同一牌号、同一配料与同一生产工艺过程中生产的铸件。

5）试验时，一组应有三个试样，其中两个的拉伸强度和伸长率合格，则其所代表的铸件性能为合格。如果不合格，则其复验的方法（取样个数及评判标准）均由订货技术条件规定。如果试棒有缺陷，则试验结果作废。

6）球墨铸铁的拉伸试样形状及尺寸分别如图1-27和表1-9所示。

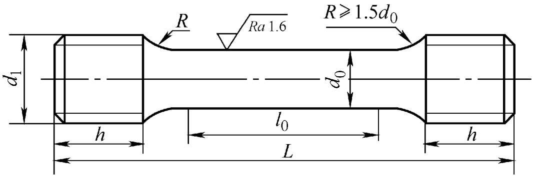



图1-27　球墨铸铁拉伸试样

**表1-9　球墨铸铁拉伸试样尺寸的选择**

| 毛坯直径/mm | 试样直径 $d_0$/mm | 工作部分长度 $l_0$/mm | 端部长度 $h$/mm | 螺纹部分直径 $d_1$/mm | 总长 $L$/mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 8±0.05 | 40 | 16 | M12 | 90 |
| 18 | 10±0.05 | 50 | 20 | M16 | 110 |
| 20 | 13±0.05 | 65 | 24 | M18 | 140 |
| 30 | 20±0.10 | 100 | 36 | M28 | 210 |
| 45 | 30±0.20 | 150 | 50 | M42 | 310 |

## 1.3　数值修约规则

### 1.3.1　术语和定义

（1）数值修约　通过省略原数值的最后若干位数字，调整所保留的末位数字，使最后所得到的值最接近原数值的过程。经数值修约后的数值称为（原数值的）修约值。

（2）修约间隔　修约值的最小数值单位。修约间隔的数值一经确定，修约值即为该数值的整数倍。如指定修约间隔为0.1，修约值应在0.1的整数倍中选取，相当于将数值修约到一位小数。如指定修约间隔为100，修约值应在100的整数倍中选取，相当于将数值修约到“百”数位。

（3）极限数值　标准（或技术规范）中规定考核的以数量形式给出且符合该标准（或技术规范）要求的指标数值范围的界限值。

### 1.3.2　数值修约规则

**1. 确定修约间隔**

1）指定修约间隔为 $10^{-n}$（$n$ 为正整数），或指明将数值修约到 $n$ 位小数。

2）指定修约间隔为1，或指明将数值修约到“个”数位。

3）指定修约间隔为 $10^n$（$n$ 为正整数），或指明将数值修约到 $10^n$ 数位，或指明将数值修约到“十”“百”“千”等数位。

**2. 进舍规则**

1）拟舍弃数字的最左一位数字小于 5，则舍去，保留其余各位数字不变。例如：将 12.1498 修约到个数位，得 12；将 12.1498 修约到一位小数，得 12.1。

2）拟舍弃数字的最左一位数字大于 5，则进一，即保留数字的末位数字加 1。例如：将 1268 修约到“百”数位，得 $13\times10^2$（特定场合可写为 1300）。

3）拟舍弃数字的最左一位数字是 5，且其后有非 0 数字时进一，即保留数字的末位数字加 1。例如：将 10.5002 修约到个数位，得 11。

4）拟舍弃数字的最左一位数字为 5，且其后无数字或皆为 0 时，若所保留的末位数字为奇数（1，3，5，7，9）则进一，即保留数字的末位数字加 1；若所保留的末位数字为偶数（0，2，4，6，8），则舍去。例如：修约间隔为 0.1 时，拟修约数值 1.050 修约为 $10\times10^{-1}$。

5）负数修约时，先将它的绝对值按 1）~4）的规定进行修约，然后在所得值前面加上负号。例如：将 -0.0365 修约到三位小数为 $-36\times10^{-3}$。

6）不得多次连续修约。拟修约数字应在确定修约间隔或指定修约数位后一次修约获得结果，不得多次连续修约。例如：修约 97.46，修约间隔为 1。正确的做法：97.46→97；不正确的做法：97.46→97.5→98。

**3. 修约程序**

在具体实施中，有时测试与计算部门先将获得数值按指定的修约数位多一位或几位报出，而后由其他部门判定。为避免产生连续修约的错误，应按下述步骤进行。

1）报出数值最右的非零数字为 5 时，应在数值右上角加“+”或加“-”或不加符号，分别表明已进行过舍、进或未舍未进。例如：$16.50^+$ 表示实际值大于 16.50，经修约舍弃为 16.50；$16.50^-$ 表示实际值小于 16.50，经修约进一为 16.50。

2）如对报出值需进行修约，当拟舍弃数字的最左一位数字为 5，且其后无数字或皆为零时，数值右上角有“+”者进一，有“-”者舍去。数字修约到个数位示例如表 1-10 所示。

**表 1-10　数字修约到个数位示例**

| 实测值 | 报出值 | 修约值 | 实测值 | 报出值 | 修约值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 15.4546 | $15.5^-$ | 15 | -16.5203 | $-16.5^+$ | -17 |
| -15.4546 | $-15.5^-$ | -15 | 17.5000 | 17.5 | 18 |
| 16.5203 | $16.5^+$ | 17 | | | |

**4. 0.5 单位修约与 0.2 单位修约**

（1）0.5 单位修约（半个单位修约）　0.5 单位修约是指按指定修约间隔对拟修约的数值 0.5 单位进行的修约。0.5 单位修约方法如下：将拟修约数值 $X$ 乘以 2，按指定修约间隔对 $2X$ 进行修约，所得数值（小于 $2X$ 修约值）再除以 2。按 0.5 单位修约到个位数示例如表 1-11 所示。

表 1-11　按 0.5 单位修约到个位数示例

| 拟修约数值 $X$ | $2X$ | $2X$ 修约值 | $X$ 修约值 |
|---|---|---|---|
| 60.25 | 120.50 | 120 | 60.0 |
| 60.38 | 120.76 | 121 | 60.5 |
| 60.28 | 120.56 | 121 | 60.5 |
| −60.75 | −121.50 | −122 | −61.0 |

（2）0.2 单位修约　0.2 单位修约是指按指定修约间隔对拟修约的数值 0.2 单位进行的修约。0.2 单位修约方法如下：将拟修约数值 $X$ 乘以 5，按指定修约间隔对 $5X$ 进行修约，所得数值（$5X$ 修约值）再除以 5。按 0.2 单位修约到百位数示例如表 1-12 所示。

表 1-12　按 0.2 单位修约到百位数示例

| 拟修约数值 $X$ | $5X$ | $5X$ 修约值 | $X$ 修约值 |
|---|---|---|---|
| 830 | 4150 | 4200 | 840 |
| 842 | 4210 | 4200 | 840 |
| 832 | 4160 | 4200 | 840 |
| −930 | −4650 | −4600 | −920 |

## 1.3.3　极限数值的表示和判定

**1. 书写极限数值的一般原则**

1）规定考核的以数量形式给出的指标或参数等，应当规定极限数值。极限数值表示符合要求的数值范围的界限值，它通过给出最小极限值和（或）最大极限值，或给出基本数值与极限偏差值等方式表达。

2）极限数值的表示形式及书写位数应适当，其有效数字应全部写出。书写位数表示的精确程度，应能保证产品或其他对象应有的性能和质量。

**2. 表示极限数值的用语**

1）表达极限数值的基本用语及符号如表 1-13 所示。

表 1-13　表达极限数值的基本用语及符号

| 基本用语 | 符号 | 特定情形下的基本用语 | | | 注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 大于 $A$ | $>A$ | | 多于 $A$ | 高于 $A$ | 测定值或计算值恰好为 $A$ 值时不符合要求 |
| 小于 $A$ | $<A$ | | 少于 $A$ | 低于 $A$ | 测定值或计算值恰好为 $A$ 值时不符合要求 |
| 大于或等于 $A$ | $\geqslant A$ | 不小于 $A$ | 不少于 $A$ | 不低于 $A$ | 测定值或计算值恰好为 $A$ 值时符合要求 |
| 小于或等于 $A$ | $\leqslant A$ | 不大于 $A$ | 不多于 $A$ | 不高于 $A$ | 测定值或计算值恰好为 $A$ 值时符合要求 |

注：$A$ 为极限数值。

2）基本用语可以组合使用表示极限值范围。

对特定的考核指标 $X$，允许采用如表 1-14 所示的用语和符号，同一技术文件中一般只应使用一种符号表示方式。

3）基本数值 $A$ 带有绝对极限上偏差值 $+b_1$ 和绝对极限下偏差值 $-b_2$，指从 $A-b_2$ 到 $A+b_1$，符合要求，记为 $A^{+b_1}_{-b_2}$。当 $b_1=b_2=b$ 时，$A^{+b_1}_{-b_2}$可简记为 $A\pm b$。

**表 1-14　对于特定的考核指标 $X$ 允许采用的表达极限数值的组合用语及符号**

| 组合基本用语 | 组合允许用语 | 符号 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 表示方式Ⅰ | 表示方式Ⅱ | 表示方式Ⅲ |
| 大于或等于 $A$ 且小于或等于 $B$ | 从 $A$ 到 $B$ | $A \leqslant X \leqslant B$ | $A \leqslant \cdot \leqslant B$ | $A \sim B$ |
| 大于 $A$ 且小于或等于 $B$ | 超过 $A$ 到 $B$ | $A < X \leqslant B$ | $A < \cdot \leqslant B$ | $>A \sim B$ |
| 大于或等于 $A$ 且小于 $B$ | 至少 $A$ 不足 $B$ | $A \leqslant X < B$ | $A \leqslant \cdot < B$ | $A \sim <B$ |
| 大于 $A$ 且小于 $B$ | 超过 $A$ 不足 $B$ | $A < X < B$ | $A < \cdot < B$ | |

4）基本数值 $A$ 带有相对极限上偏差值 $+b_1\%$ 和相对极限下偏差值 $-b_2\%$，指实测值或其计算值 $R$ 对于 $A$ 的相对偏差值［$(R-A)/A$］从 $-b_2\%$ 到 $+b_1\%$ 符合要求，记为 $A^{+b_1}_{-b_2}\%$。当 $b_1=b_2=b$ 时，$A^{+b_1}_{-b_2}\%$ 可记为 $A(1 \pm b\%)$。

5）对基本数值 $A$，若极限上偏差值 $+b_1$ 和（或）极限下偏差值 $-b_2$ 使得 $A+b_1$ 和（或）$A-b_2$ 不符合要求，则应附加括号，写成 $A^{+b_1}_{-b_2}$（不含 $b_1$ 和 $b_2$）或 $A^{+b_1}_{-b_2}$（不含 $b_1$）、$A^{+b_1}_{-b_2}$（不含 $b_2$）。

**3. 测定值或其计算值与规定的极限数值作比较的方法**

在判定测定值或其计算值是否符合要求时，应将测试所得的测定值或其计算值与规定的极限数值作比较，比较的方法可采用全数值比较法或修约值比较法。

当有关文件中对极限数值（包括带有极限偏差值的数值）无特殊规定时，均应使用全数值比较法。如规定采用修约值比较法，应加以说明。若规定了使用其中一种比较方法时，一经确定，不得改动。

（1）全数值比较法　将测试所得的测定值或计算值不经修约处理（或虽经修约处理，但应标明它是经舍、进或未进未舍而得），用该数值与规定的极限数值作比较，只要超出极限数值规定的范围（不论超出程度大小），都判定为不符合要求。全数值比较法的示例如表 1-15 所示。

（2）修约值比较法　将测定值或其计算值进行修约，修约数位应与规定的极限数值数位一致。

1）当测试或计算精度允许时，应先将获得的数值按指定的修约数位多一位或几位报出，然后按规定修约至规定的数位。

2）将修约后的数值与规定的极限数值进行比较，只要超出极限数值规定的范围（不论超出程度大小），都判定为不符合要求。修约值比较法的示例如表 1-15 所示。

**表 1-15　全数值比较法和修约值比较法的示例和比较**

| 项　　目 | 极限数值 | 测定值或其计算值 | 按全数值比较是否符合要求 | 修约值 | 按修约值比较是否符合要求 |
|---|---|---|---|---|---|
| 中碳钢抗拉强度/MPa | $\geqslant 14 \times 100$ | 1349 | 不符合 | $13 \times 100$ | 不符合 |
| | | 1351 | 不符合 | $14 \times 100$ | 符合 |
| | | 1400 | 符合 | $14 \times 100$ | 符合 |
| | | 1402 | 符合 | $14 \times 100$ | 符合 |
| NaOH 的质量分数（%） | $\geqslant 97.0$ | 97.01 | 符合 | 97.0 | 符合 |
| | | 97.00 | 符合 | 97.0 | 符合 |
| | | 96.96 | 不符合 | 97.0 | 符合 |
| | | 96.94 | 不符合 | 96.9 | 不符合 |

（续）

| 项　　目 | 极限数值 | 测定值或其计算值 | 按全数值比较是否符合要求 | 修约值 | 按修约值比较是否符合要求 |
|---|---|---|---|---|---|
| 中碳钢的硅的质量分数（%） | ≤0.5 | 0.452 | 符合 | 0.5 | 符合 |
| | | 0.500 | 符合 | 0.5 | 符合 |
| | | 0.549 | 不符合 | 0.5 | 符合 |
| | | 0.551 | 不符合 | 0.6 | 不符合 |
| 中碳钢的锰的质量分数（%） | 1.2～1.6 | 1.151 | 不符合 | 1.2 | 符合 |
| | | 1.200 | 符合 | 1.2 | 符合 |
| | | 1.649 | 不符合 | 1.6 | 符合 |
| | | 1.651 | 不符合 | 1.7 | 不符合 |
| 盘条直径/mm | 10.0±0.1 | 9.89 | 不符合 | 9.9 | 符合 |
| | | 9.85 | 不符合 | 9.8 | 不符合 |
| | | 10.10 | 符合 | 10.1 | 符合 |
| | | 10.16 | 不符合 | 10.2 | 不符合 |
| 盘条直径/mm | 10.0±0.1（不含0.1） | 9.94 | 符合 | 9.9 | 不符合 |
| | | 9.96 | 符合 | 10.0 | 符合 |
| | | 10.06 | 符合 | 10.1 | 不符合 |
| | | 10.05 | 符合 | 10.0 | 符合 |
| 盘条直径/mm | 10.0±0.1（不含+0.1） | 9.94 | 符合 | 9.9 | 符合 |
| | | 9.86 | 不符合 | 9.9 | 符合 |
| | | 10.06 | 符合 | 10.1 | 不符合 |
| | | 10.05 | 符合 | 10.0 | 符合 |
| 盘条直径/mm | 10.0±0.1（不含−0.1） | 9.94 | 符合 | 9.9 | 不符合 |
| | | 9.86 | 不符合 | 9.9 | 不符合 |
| | | 10.06 | 符合 | 10.1 | 符合 |
| | | 10.05 | 符合 | 10.0 | 符合 |

注：表中的示例并不表明这类极限数值都应采用全数值比较法或修约值比较法。

（3）两种判定方法的比较　对测定值或其计算值与规定的极限数值在不同情形用全数值比较法和修约值比较法的比较结果的示例如表 1-15 所示。对同样的极限数值，若它本身符合要求，则全数值比较法比修约值比较法相对较严格。

# 1.4　试验数据的处理和误差分析

## 1.4.1　误差的定义和分类

### 1. 误差的定义

一个物体的尺寸或质量，一种材料的抗拉强度或弹性模量都存在一个客观真正的值，称为真值。在对其进行测量时，得到的结果称为实测值。误差就定义为实测值与真值之差，即

$$\varepsilon = x - x_0$$

式中　$\varepsilon$——误差；

$x$ 和 $x_0$——实测值和真值。

1）在测量中，如果 $x_0$ 代表某一物体的真实长度，$x$ 代表某一次的实测值，则 $\varepsilon = x - x_0$ 就表示测量误差。由于真值 $x_0$ 是未知的，在经过多次测量后，便可得到测量值的

算术平均值$\bar{x}$，用$\bar{x}$代替 $x_0$，便可得 $\nu = x - \bar{x}$，称 $\nu$ 为测量的偏差（或离差）。有时，可用对偏差的分析来代替对误差的分析。

2）在生产上，产品的某项技术参数往往给定一个标称值，这时将其作为真值 $x_0$。误差 $\varepsilon = x - x_0$ 就表示某一实测值与标称值之差。

3）在计算中，某物体的运动速度为 100m/s ±0.1m/s，其中 100m/s 代表真值 $x_0$，而 ±0.1m/s 表示误差，称它为计算误差。

**2. 真值和平均值**

由于测量仪器、测量方法、环境、人的观察能力等条件的限制，真值往往是无法测得的。但当测量的次数不断增加时，根据随机的正误差和负误差出现的概率相等并抵消的原理，在没有系统误差的条件下，平均值会趋近于真值。基于这种思想，用平均值（即子样的平均值）来估计和推断真值（在一定的量置信度下），并在条件许可的情况下，尽量增加测量次数。

（1）算术平均值　设一组观测值为 $x_1$，$x_2$，…，$x_n$，$n$ 是观测次数，则算术平均值$\bar{x}$定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

假设观测值 $x_i$ 服从正态分布，则可证明，在一组等精度的测量中算术平均值为最佳值。

（2）均方根平均值　这种方法来源于计算分子的平均动能，后推广用于误差的计算中，其定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{n}}\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

（3）加权平均值　如对同一物理量用不同方法测定，或由不同的人员测定，则在计算平均值中常常对比较可靠的数据予以加权，然后再平均，称加权平均，其定义为

$$\bar{x} = \frac{w_1x_1 + w_2x_2 + \cdots + w_nx_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \sum_{i=1}^{n} w_ix_i / \sum_{i=1}^{n} w_i$$

式中　$x_1$，$x_2$，…，$x_n$——一组观测值；

$w_1$，$w_2$，…，$w_n$——对应于各观测值的加权数。

（4）中位值　将一组观测值按从小到大（或从大到小）的次序排列，则处在最中间位置的值就称为中位值。如果观测次数 $n$ 为奇数，则排列在中间的那个数就是中位值。如果 $n$ 为偶数，则中位值就是位于中间两个数的平均值。中位值的最大优点是求法简单，且与两端数据的变化无关，在数理统计中应用很广。

（5）几何平均值　一组 $n$ 个观测值连乘，然后再开 $n$ 次方得到的值称为几何平均值，其公式为

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1x_2\cdots x_n}$$

上式两边取对数，则

$$\lg\bar{x} = \frac{1}{n}[\lg x_1 + \lg x_2 + \cdots + \lg x_n] = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lg x_i$$

上式说明，一组观测值取对数后的算术平均值，它的反对数就是这组观测值的几何平均值。

**3. 误差的分类**

在测量中，无论所用的仪器多么精密，方法多么完善，试验者多么细心，所得结果往往也不尽相同。在生产中，尽管工艺和加工方法均一致，最后产品的尺寸、重量或其他技术参数也会存在差异。在计算中，计算工具的精度不同或计算方法不同也会带来不同的舍弃误差。

误差可按不同的方法分类。按误差的绝对值和相对值可分为绝对误差和相对误差，按误差的性质及其产生原因，误差可分为系统误差、偶然误差和过失误差。

（1）系统误差　指在重复测量中，其值恒定不变或遵循一定规律变化的一类误差，又叫确定性误差或恒定误差。系统误差的来源主要有工具误差、装置误差、人身误差、外界误差和方法误差。

1）工具误差指由测量工具、仪器等产生的误差，又称为仪差。它是由于测量工具或仪器不完善而产生的，例如刻度不准、砝码未校正等。

2）装置误差指由于测量设备和仪器的电路、安装、布置和调整不恰当而造成的误差。

3）人身误差（个人误差或人差）指由于测量人员的感觉器官不完善而引起，例如某人在读数时视线总是偏向一边，从而造成读数误差，这种误差往往因人而异。

4）外界误差（环境误差）指由于周围环境，如温度、气压、湿度和电磁场等的影响而产生的误差。

5）方法误差（理论误差）指由于测量方法本身所依据的理论、模型不完善所带来的误差。

系统误差的出现是有规律的，其产生的原因是可知的和能够找到的。对试验中所用的测量工具、仪器的精度进行鉴定，便可降低系统误差。对于不能消除的系统误差，要设法估计出其数值大小，以便进行修正。

（2）偶然误差（随机误差）　在消除了系统误差或降低系统误差至一定范围（例如拉力机载荷精度控制在 $\pm 0.5\%$）后，对同一对象进行反复测量时，结果也会出现差异，这时产生的误差叫做偶然误差。

偶然误差的特点是时大时小，时正时负，其产生原因是多方面的、不确知的，因而也是无法控制的。在同样条件下，对同一个物理量作重复测定，若测量次数足够多，则可发现偶然误差完全服从统计性规律。当测量次数无限增大时，偶然误差的算术平均值将趋近于零，因此多次测量结果的算术平均值将接近于真值。

## 1.4.2　直接测定量的误差表示法

通过测量能直接得到结果的量称为直接测定量，如人的高度和重量、拉伸试样的载荷和伸长量等。通过几个量的测量后要经过计算才能得到的量，叫做间接测定量，如物质的密度、材料的抗拉强度和断裂韧度等。

**1. 误差的分布规律**

在不致引起误会的情况下常把偶然误差简称为误差。误差的特点有：

1）绝对值相等的正误差和负误差，其出现的概率相同。

2）绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小。

3）绝对值很大的误差出现的概率接近于零，即误差有一定的极限。

4）当测量次数 $n\to\infty$ 时，误差的算术平均值趋近于零，这是由于正负误差互相抵消的结果。

**2. 误差的表示方法**

（1）范围误差　范围误差是指一组测量值中最大值与最小值之差，表示误差的变化范围。例如，对某钢材进行拉伸试验得到 10 个抗拉强度 $R_m$（单位为 MPa）的数据为 745、750、751、759、763、766、770、781、784、785。则其范围误差为（785－745）MPa＝40MPa。范围误差的优点是直观、简便，缺点是只取决于一组测量值的两个极端值，而与测量次数无关，与中间数据的大小无关，这显然与偶然误差和测量次数有关这一事实相违背。

（2）算术平均误差　是表示误差的较好方法，其定义为

$$\delta = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i - \bar{x}|$$

式中　$\delta$——算术平均误差；

$x_i$——第 $i$ 个观测值；

$\bar{x}$——$n$ 个观测值的算术平均值；

$|x_i-\bar{x}|$——偏差的绝对值，因为偏差有正有负，所以取绝对值加以平均。

以上面 10 个 $R_m$ 数据为例，其中 $\bar{x}=765.4$MPa 计算得到 $\delta=11.8$MPa。算术平均误差的优点是比范围误差精细，考虑了每一个 $|x_i-\bar{x}|$，其缺点是无法鉴别两组测量值间的偏差大小。例如有两组测量值，尽管其 $\delta$ 可相等，但其偏差（$x_i-\bar{x}$）可以很分散。

（3）标准误差　也称均方根误差，其计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

在观测次数 $n$ 较小时，标准误差常表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

标准误差 $\sigma$ 是各观测值 $x_i$ 的函数，且对 $x_i$ 的大小比较敏感，所以是表示精密度的一个较好的指标，已广泛用于误差分析中。

### 1.4.3　力学性能试验数据处理示例

**1. 可疑观测值的取舍**

处理力学性能试验结果时，特别是处理疲劳寿命试验结果时，常常会发现在一组数据中，某一观测值特别偏高或特别偏低，使人产生怀疑，称之为可疑观测值。对可疑观测值的取舍，不能采取随意的态度，而应科学严格地加以分析判别，然后决定取舍。

对可疑观测值的分析和判别可从物理本质方面进行分析和从概率的观点进行数学处理。例如，对偏低的疲劳寿命，要检查试样的断口是否有夹杂、气孔，在疲劳源附近是否有表面划伤、锈蚀或加工刀痕等，试验过程中试验机是否产生了横振，鼓轮的跳动量是否超差等。经过分析，确系上述诸因素之一引起该试样寿命值偏低，才能作出取舍的决定。

从物理本质方面进行详细的分析而仍然不得要领时，可疑观测值的取舍可用数学判别的方法。这种判别方法的基础是在同一试验条件下，取得过大或过小的观测值，均属于小概率事件。根据实际推断原理，小概率事件在一次试验中几乎是不可能出现的，从而建立起取舍的判别准则。

（1）拉依达准则　在相同条件下测得一组观测值 $x_1$，$x_2$，…，$x_n$，计算出均值$\bar{x}$和标准差 $\sigma$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right]^{1/2} = \left\{\left[\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2\right]\Big/(n-1)\right\}^{1/2}$$

如果 $x_i$ 为可疑观测值，则计算偏差 $v_i = x_i - \bar{x}$，如果 $|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\sigma$，则舍去 $x_i$，否则保留 $x_i$。上式又称为 $3\sigma$ 准则。例如已知某物体的温度经 15 次测量，其值如表 1-16 所示，求决定 $x_8 = 20.30$℃的取舍。

**表 1-16　测量结果及处理**

| $i$ | $x_i$/℃ | $y_i = x_i - 20.4$℃ | $y_i^2$ | $i$ | $x_i$/℃ | $y_i = x_i - 20.4$℃ | $y_i^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20.42 | 0.02 | 0.0004 | 11 | 20.42 | 0.02 | 0.0004 |
| 2 | 20.43 | 0.03 | 0.0009 | 12 | 20.41 | 0.01 | 0.0001 |
| 3 | 20.40 | 0.00 | 0.00 | 13 | 20.39 | −0.01 | 0.0001 |
| 4 | 20.43 | 0.03 | 0.0009 | 14 | 20.39 | −0.01 | 0.0001 |
| 5 | 20.42 | 0.02 | 0.0004 | 15 | 20.40 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 20.43 | 0.03 | 0.0009 | 15 个值的计算 | 总和 | 0.06 | 0.0152 |
| 7 | 20.39 | −0.01 | 0.0001 | | 平均值 | 0.004 | |
| 8 | 20.30 | −0.10 | 0.0100 | 去掉第 8 个值后其余 14 个值的计算 | 总和 | 0.16 | 0.0052 |
| 9 | 20.40 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 10 | 20.43 | 0.03 | 0.0009 | | 平均值 | 0.011 | |

将 15 次测量的结果 $x_i$ 及 $y_i = x_i - 20.4$ 和 $y_i^2$ 均列于表 1-14。在计算 $x_i$ 的标准差时，由于 $x_i$ 的数值太大，可用 $y_i = x_i - b$ 代替，这样由于 $y_i - \bar{y} = x_i - \bar{x} = v_i$，所以 $y_i$ 的 $\sigma$ 和 $x_i$ 的 $\sigma$ 是一样的，上例中，$y_i$ 的 $\sigma$ 为

$$\sigma = \left\{\left[\sum y_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum y_i\right)^2\right]\Big/(n-1)\right\}^{1/2} = \left\{\left[0.0152 - \frac{1}{15}\times 0.06^2\right]\Big/14\right\}^{1/2} = 0.033$$

于是 $3\sigma = 3\times 0.033 = 0.099$，偏差绝对值 $|v_i| = |x_8 - 20.404| = |-0.1041| > 0.099$，所以应该舍去 $x_8 = 20.30$℃这个观测值。去掉 $x_8$ 后，剩下的 14 个数据，作第二次计算，得 $\sigma = 0.016$，$3\sigma = 0.048$，偏差 $|x_i - 20.411|$ 均小于 $3\sigma = 0.048$，均属有效。

（2）肖维奈准则　该准则是根据正态分布原理得到的。在一组测量值 $x_1$，$x_2$，…，

$x_n$ 中，当可疑值 $x_i$ 小于下限 $a$ 或大于上限 $b$ 时，则可舍去 $x_i$。而 $a$ 和 $b$ 两个点是根据小概率 $1/2n$ 来确定的。例如，设 $n=11$，则 $1/2n=4.55\%$，$a$ 点以下和 $b$ 点以上的正态曲线所包围的面积均为 4.55% 的一半即 2.28%，如图 1-28 所示。查标准正态分布表，即可得 $\frac{x_i-\bar{x}}{S}$ 的限度，列于表 1-17 中。

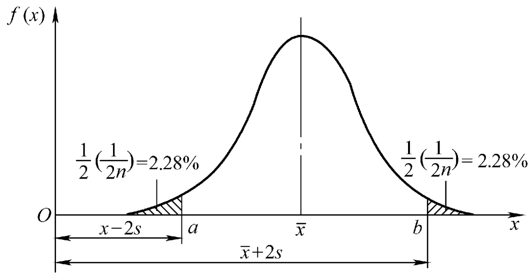



图 1-28　肖维奈准则示意图

对于一组观测值中的某一可疑值 $x_i$，只要其计算的绝对值 $\left|\frac{x_i-\bar{x}}{S}\right|$ 超过相应的限值，则应舍去之，否则就应保留它。

上例中根据 $n=15$，查表 1-17 得限值 $\left|\frac{x_i-\bar{x}}{S}\right|=2.13$。$2.13\times0.033=0.07$，$|x_8-\bar{x}|=|20.30-20.404|=|-0.104|=0.104>0.07$，所以舍去 $x_8$。进一步计算：根据 $n=14$，查表得限值为 2.10，则 $2.10\times0.016=0.034$，舍去 $x_8$ 后，其余 $x_i$ 的偏差绝对值均未超过 0.034，故均予以保留。

**表 1-17　肖维奈准则中的限值**

| 子样大小 $n$ | $\left\|\frac{x_i-\bar{x}}{S}\right\|$ | 子样大小 $n$ | $\left\|\frac{x_i-\bar{x}}{S}\right\|$ | 子样大小 $n$ | $\left\|\frac{x_i-\bar{x}}{S}\right\|$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 1.38 | 13 | 2.07 | 23 | 2.30 |
| 4 | 1.53 | 14 | 2.10 | 24 | 2.31 |
| 5 | 1.65 | 15 | 2.13 | 25 | 2.33 |
| 6 | 1.73 | 16 | 2.15 | 30 | 2.39 |
| 7 | 1.80 | 17 | 2.17 | 40 | 2.49 |
| 8 | 1.86 | 18 | 2.20 | 50 | 2.58 |
| 9 | 1.92 | 19 | 2.22 | 75 | 2.71 |
| 10 | 1.96 | 20 | 2.24 | 100 | 2.81 |
| 11 | 2.00 | 21 | 2.26 | 200 | 3.02 |
| 12 | 2.03 | 22 | 2.28 | 500 | 3.20 |

**2. 对比试验结果的统计处理**

力学性能试验往往会涉及两种工艺、两种配方和两种设计方案的比较，这时就要作对比试验。例如，将欲对比的两组试样（一组经过喷丸处理，另一组未经喷丸处理），在同一加载条件下进行疲劳试验，根据疲劳寿命（或强度）的观测值，判别其疲劳性能是否相同，或其中的一组优于另一组。

由于疲劳试验结果的分散性，即使完全相同的两组试样，在同一台试验机及同一加载条件下进行试验，也会发现这两组试验数据的平均值和标准差存在着一定差异。当然，这种差异是由偶然误差所引起的，因此这种差异是不显著的。如果这两组试样是来源于两种材料，或一种材料的两种热处理，或两种不同的喷丸工艺等，这时两组试验结

果的差异中，不仅包含了偶然误差，而且还包含了系统误差。这就要求对比试验结果的统计处理方法，能鉴别出这两组试验结果之间的差异是显著的（存在系统误差），还是不显著的（仅仅存在偶然误差）。

在对比试验中，有时关心的是两组试样平均值之间的差异，但有时也对两组试样的分散性（标准差）感兴趣。因此，对比试验结果的统计处理方法必须提供对母体平均值作假设检验和对母体标准差作假设检验的不同方法。

# 第 2 章　材料拉伸性能测定试验

## 2.1　材料拉伸性能相关知识

**1. 拉伸性能及拉伸试验的定义**

材料的弹性、强度、塑性、应变硬化等许多重要的力学性能指标统称为拉伸性能，它是材料的基本力学性能。根据拉伸性能可预测材料的其他力学性能，如疲劳、断裂等。在工程应用中，拉伸性能是结构静强度设计的主要依据。

拉伸试验是标准拉伸试样在静态轴向拉伸力不断作用下以规定的拉伸速度拉至断裂，并在拉伸过程中连续记录力与伸长量，从而求出其强度判据和塑性判据的力学性能试验。

**2. 金属材料拉伸试验常用术语**

（1）标距（$L$）　测量伸长用的试样圆柱或棱柱部分的长度。

（2）原始标距（$L_o$）　室温下施力前的试样标距。

（3）断后标距（$L_u$）　在室温下将断后的两部分试样紧密地对接在一起，保证两部分的轴线位于同一条直线上，测量试样断裂后的标距。

（4）平行长度（$L_c$）　试样平行缩减部分的长度。

（5）伸长　试验期间任一时刻原始标距（$L_o$）的增量。

（6）伸长率　原始标距的伸长与原始标距（$L_o$）之比的百分率。

（7）残余伸长率　卸除指定的应力后，伸长相对于原始标距（$L_o$）的百分率。

（8）断后伸长率（$A$）　断后标距的残余伸长（$L_u - L_o$）与原始标距（$L_o$）之比的百分率。对于比例试样，若原始标距不为 $5.65\sqrt{S_o}$（$S_o$ 为平行长度的原始横截面积），符号 $A$ 应附以下角标说明所使用的比例系数，例如 $A_{11.3}$ 表示原始标距（$L_o$）为 $11.3\sqrt{S_o}$ 的断后伸长率。对于非比例试样，符号 $A$ 应附以下角标说明所使用的原始标距，以毫米（mm）表示，例如 $A_{80mm}$ 表示原始标距（$L_o$）为 80mm 的断后伸长率。

（9）引伸计标距（$L_e$）　用引伸计测量试样延伸时所使用引伸计起始标距长度。理想的 $L_e$ 应大于 $L_o/2$ 但小于约 $0.9L_c$。这将保证引伸计检测到发生在试样上的全部屈服。测定最大力时或在最大力之后的性能时，推荐 $L_e$ 等于 $L_o$ 或近似等于 $L_o$，但测定断后伸长率时 $L_e$ 应等于 $L_o$。

（10）延伸　试验期间任一给定时刻引伸计标距 $L_e$ 的增量。

（11）延伸率　用引伸计标距 $L_e$ 表示的延伸百分率。

（12）残余延伸率　试样施加并卸除应力后引伸计标距的增量与引伸计标距 $L_e$ 之比的百分率。

（13）屈服点延伸率（$A_e$）　呈现明显屈服（不连续屈服）现象的金属材料，屈服开始至均匀加工硬化开始之间引伸计标距的延伸与引伸计标距 $L_e$ 之比的百分率。

（14）最大力总延伸率（$A_{gt}$）　最大力时原始标距的总延伸（弹性延伸加塑性延伸）与引伸计标距 $L_e$ 之比的百分率，如图 2-1 所示。在应力-延伸率曲线上不允许的不连续性示例如图 2-2 所示。

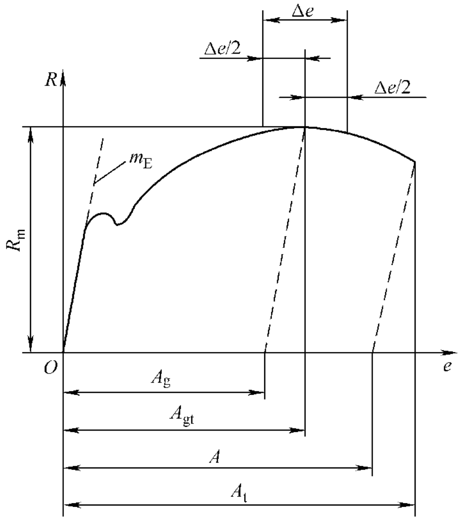



图 2-1　延伸的定义

A—断后伸长率　$A_g$—最大力塑性延伸率

$A_{gt}$—最大力总延伸率　$A_t$—断裂总延伸率

e—延伸率　$m_E$—应力-延伸率曲线上弹性部分的斜率　R—应力　$R_m$—抗拉强度

Δe—平台范围

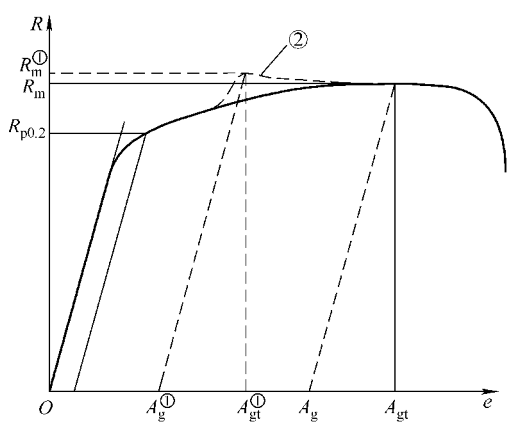



图 2-2　在应力-延伸率曲线上不允许的不连续性示例

$A_g$—最大力塑性延伸率　$A_{gt}$—最大力总延伸率

e—延伸率　R—应力　$R_m$—抗拉强度

$R_{p0.2}$—规定塑性延伸强度

① 非真实值，产生了突然的应变速率增加。

② 应变速率突然增加时的应力-应变行为。

（15）最大力塑性延伸率（$A_g$）　最大力时原始标距的塑性延伸与引伸计标距 $L_e$ 之比的百分率，如图 2-1 所示。

（16）断裂总延伸率（$A_t$）　断裂时刻原始标距的总延伸（弹性延伸加塑性延伸）与引伸计标距 $L_e$ 之比的百分率，如图 2-1 所示。

（17）应变速率（$\dot{e}_{L_e}$）　用引伸计标距 $L_e$ 测量时单位时间的应变增加值。

（18）平行长度应变速率的估计值（$\dot{e}_{L_c}$）　根据横梁位移速率和试样平行长度 $L_c$ 计算的试样平行长度的应变单位时间内的增加值。

（19）横梁位移速率（$v_c$）　单位时间的横梁位移。

（20）应力速率（$\dot{R}$）　单位时间应力的增加。

（21）断面收缩率（Z）　断裂后试样横截面积的最大缩减量（$S_o-S_u$）与原始横截

面积（$S_o$）比值的百分率。

（22）最大力（$F_m$）　对于无明显屈服（不连续屈服）的金属材料，为试验期间的最大力。对于有不连续屈服的金属材料，在加工硬化开始之后，试样所承受的最大力。

（23）应力（$R$）　试验期间任一时刻的力除以试样原始横截面积（$S_o$）之商。

（24）抗拉强度（$R_m$）　相应最大力（$F_m$）对应的应力。

（25）屈服强度　当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点，应区分上屈服强度和下屈服强度。

（26）上屈服强度（$R_{eH}$）　试样发生屈服而力首次下降前的最大应力，如图 2-3 所示。

（27）下屈服强度（$R_{eL}$）　在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最小应力，如图 2-3 所示。

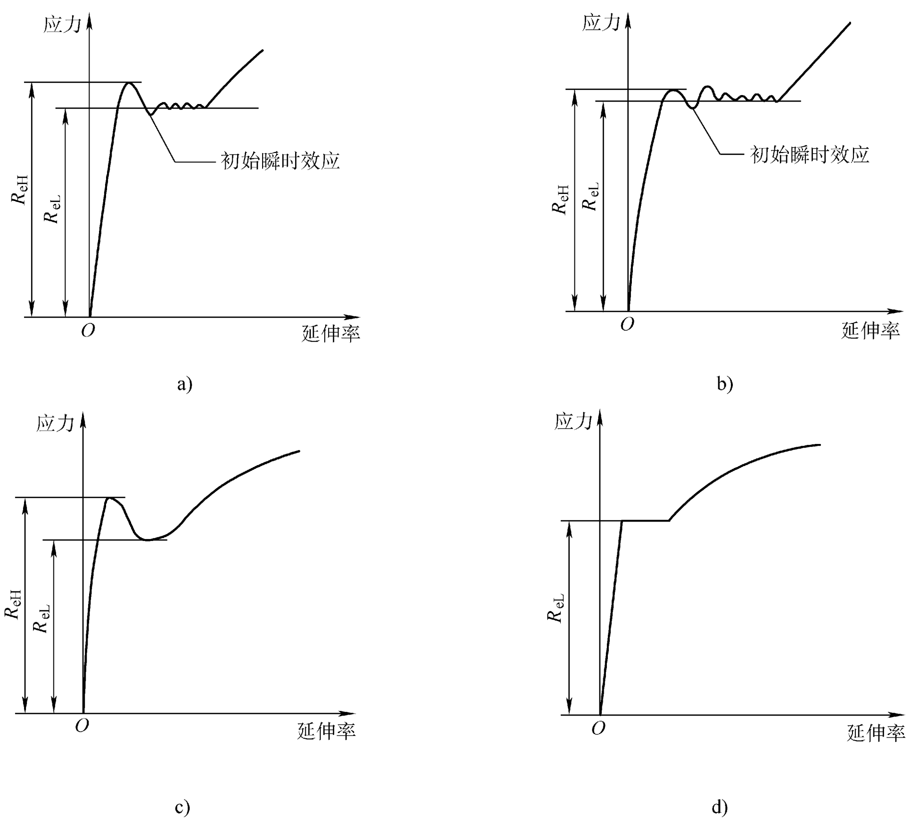



图 2-3　不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度（$R_{eH}$和 $R_{eL}$）

a）Ⅰ类　b）Ⅱ类　c）Ⅲ类　d）Ⅳ类

（28）规定塑性延伸强度（$R_p$）　塑性延伸率等于规定的引伸计标距 $L_e$ 百分率时对

应的应力，如图 2-4 所示。使用的符号应附下角标说明所规定的塑性延伸率，例如 $R_{p0.2}$表示规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力。

（29）规定总延伸强度（$R_t$）　总延伸率等于规定的引伸计标距 $L_e$ 百分率时的应力，如图 2-5 所示。使用的符号应附以下角标说明所规定的总延伸率，例如 $R_{t0.5}$表示规定总延伸率为 0.5% 时的应力。

（30）规定残余延伸强度（$R_r$）　卸除应力后残余延伸率等于规定的原始标距 $L_o$ 或引伸计标距 $L_e$ 百分率时对应的应力，如图 2-6 所示。使用的符号应附以下角标说明所规定的残余延伸率，例如 $R_{r0.2}$表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力。

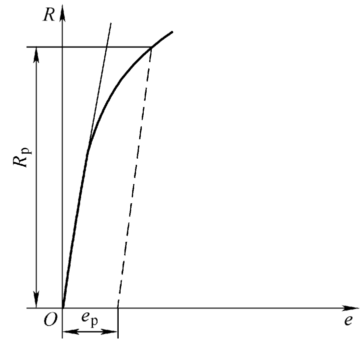



图 2-4　规定塑性延伸强度（$R_p$）

$e$—延伸率　$e_p$—规定的塑性延伸率

$R$—应力　$R_p$—规定塑性延伸强度

（31）断裂　当试样发生完全分离时的现象。

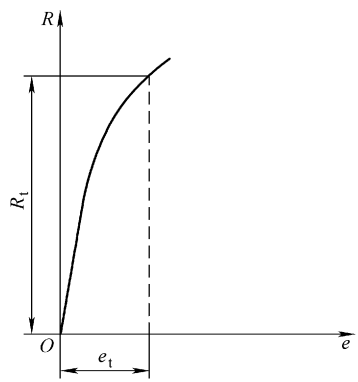



图 2-5　规定总延伸强度（$R_t$）

$e$—延伸率　$e_t$—规定的总延伸率

$R$—应力　$R_t$—规定总延伸强度

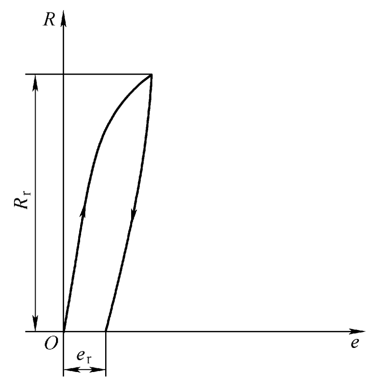



图 2-6　规定残余延伸强度（$R_r$）

$e$—延伸率　$e_r$—规定残余延伸率

$R$—应力　$R_r$—规定残余延伸强度

## 2.2　金属材料室温拉伸试验

金属材料室温拉伸试验按照 GB/T 228.1—2010《金属材料　拉伸试验　第 1 部分：室温试验方法》进行。

### 2.2.1　试样

试样的形状与尺寸取决于被检验金属制件的形状与尺寸。通常从产品、压制坯或铸锭切取样坯经机加工制成试样，但具有恒定横截面的产品（型材、棒材、线材等）和铸造试样（铸铁和铸造非铁合金）可以不经机加工而进行试验。试样横截面可以为圆形、矩形、多边形、环形，特殊情况下可以为某些其他形状。

原始标距与原始横截面积有 $L_o = k\sqrt{S_o}$ 关系者称为比例试样，国际上使用的比例系数 $k$ 的值为5.65。原始标距应不小于15mm。当试样横截面积太小，以致采用比例系数 $k$ 为5.65的值不能符合这一最小标距要求时，可以采用较高的值（优先采用11.3的值）或采用非比例试样。非比例试样其原始标距 $L_o$ 与其原始横截面积 $S_o$ 无关。

**1. 机加工的试样**

如果试样的夹持端与平行长度的尺寸不相同，它们之间应以过渡弧连接。此弧的过渡半径的尺寸可能很重要，如果对过渡半径未作规定时，建议应在相关产品标准中规定。

试样夹持端的形状应适合试验机的夹头，试样轴线应与力的作用线重合。

试样平行长度 $L_c$ 或试样不具有过渡弧时夹头间的自由长度应大于原始标距 $L_o$。

**2. 不经机加工的试样**

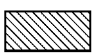
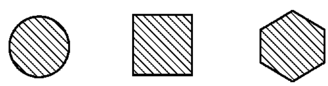
如果试样为未经机加工的产品或试棒的一段长度，两夹头间的自由长度应足够，以使原始标距的标记与夹头有合理的距离。

铸造试样应在其夹持端和平行长度之间以过渡弧连接。此弧的过渡半径的尺寸很重要，建议在相关产品标准中规定。试样夹持端的形状应适合于试验机的夹头。平行长度 $L_c$ 应大于原始标距 $L_o$。

**3. 试样的主要类型**

试样的主要类型如表2-1所示。

**表2-1　试样的主要类型**　　　　（单位：mm）

| 产品类型 | |
|---|---|
| 薄板—板材—扁材  厚度 $t$ | 线材—棒材—型材  直径或边长 |
| $0.1 \leqslant t < 3$ | — |
| — | $<4$ |
| $t \geqslant 3$ | $\geqslant 4$ |
| 管材 | |

**4. 厚度在0.1～<3mm范围内的薄板和薄带使用的试样**

（1）试样的形状　试样的夹持头部一般应比其平行长度部分宽，试样头部与平行长度之间应有过渡半径至少为20mm的过渡弧相连接，如图2-7所示。头部宽度应不小于 $1.2b_o$（$b_o$ 为原始宽度）。通过协议，也可以使用不带头试样，对于宽度等于或小于20mm的产品，试样宽度可以与产品的宽度相同。

（2）试样的尺寸　试样的尺寸如下：

1）平行长度应不小于 $L_o + b/2$。

2）对于宽度等于或小于20mm的不带头试样，除非产品标准中另有规定，原始标距 $L_o$ 应等于50mm。对于这类试样，两夹头间的自由长度应等于 $L_o + 3b_o$。

3）比例试样尺寸如表2-2所示。

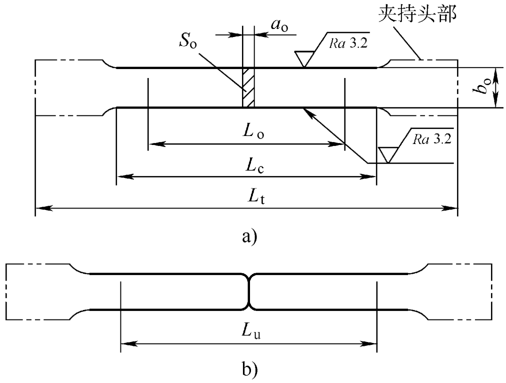



图 2-7　机加工的矩形横截面试样（试样头部仅为示意性）

a）试验前　b）试验后

$a_o$—板试样原始厚度或管壁原始厚度　$b_o$—板试样平行长度的原始宽度　$L_o$—原始标距

$L_c$—平行长度　$L_t$—试样总长度　$L_u$—断后标距　$S_o$—平行长度的原始横截面积

**表 2-2　矩形横截面比例试样尺寸**

| $b_o$/mm | $r$/mm | $k=5.65$ | | | $k=11.3$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样编号 | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样编号 |
| 10 | ≥20 | $5.65\sqrt{S_o}$<br>≥15 | $\geqslant L_o+b_o/2$<br>仲裁试验：<br>$L_o+2b_o$ | P1 | $11.3\sqrt{S_o}$<br>≥15 | $\geqslant L_o+b_o/2$<br>仲裁试验：<br>$L_o+2b_o$ | P01 |
| 12.5 | | | | P2 | | | P02 |
| 15 | | | | P3 | | | P03 |
| 20 | | | | P4 | | | P04 |

注：1. 优先采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。如果比例标距小于 15mm，建议采用表 2-3 的非比例试样。

2. 如果需要，厚度小于 0.5mm 的试样在其平行长度上可带小凸耳以便装夹引伸计。上下两凸耳宽度中心线间的距离为原始标距。

4）较广泛使用的三种非比例试样尺寸如表 2-3 所示。

**表 2-3　矩形横截面非比例试样尺寸**

| $b_o$/mm | $r$/mm | $L_o$/mm | $L_c$/mm | | 试 样 编 号 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 带头 | 不带头 | |
| 12.5 | ≥20 | 50 | 75 | 87.5 | P5 |
| 20 | | 80 | 120 | 140 | P6 |
| 25 | | 50① | 100① | 120① | P7 |

① 宽度 25mm 的试样其 $L_c/b_o$ 和 $L_o/b_o$ 与宽度 12.5mm 和 20mm 的试样相比非常低。这类试样得到的性能，尤其是断后伸长率（绝对值和分散范围），与其他两种类型试样不同。

5）当对每个试样测量尺寸时，应满足表 2-4 给出的试样宽度公差。

**表 2-4　试样宽度公差**　（单位：mm）

| 试样的名义宽度 | 尺寸公差① | 几何公差② |
|---|---|---|
| 12.5 | ±0.05 | 0.06 |
| 20 | ±0.10 | 0.12 |
| 25 | ±0.10 | 0.12 |

① 如果试样的宽度公差满足本表要求，原始横截面积可以用名义值，而不必通过实际测量再计算。

② 试样整个平行长度 $L_c$ 范围内，宽度测量值的最大最小之差。

（3）试样的制备　试样的制备方法如下：

1）制备试样应不影响其力学性能，应通过机加工方法去除由于剪切或冲切而产生的加工硬化部分材料。

2）这些试样优先从板材或带材上制备。如果可能，应保留原轧制面。

3）通过冲切制备的试样，在材料性能方面会产生明显变化。尤其是屈服强度或规定延伸强度，会由于加工硬化而发生明显变化。对于呈现明显加工硬化的材料，通常通过铣削和磨削等手段加工。

4）对于十分薄的材料，建议将其切割成等宽度薄片并叠成一叠，薄片之间用油纸隔开，每叠两侧夹以较厚薄片，然后将整叠机加工至试样尺寸。

5）机加工试样的尺寸公差和几何公差应符合表 2-4 的要求。

（4）原始横截面积的测定　原始横截面积的测定方法如下：

原始横截面积应根据试样的尺寸测量值计算得到。原始横截面积的测定应准确到 ±2%。当误差的主要部分是由于试样厚度的测量所引起的，宽度的测量误差不应超过 ±0.2%。

为了减小试验结果的测量不确定度，建议原始横截面积应准确至或优于 ±1%。对于薄片材料，需要采用特殊的测量技术。

**5. 厚度≥3mm 的板材和扁材及直径或厚度≥4mm 的线材、棒材和型材使用的试样**

（1）试样的形状　试样的形状要求如下：

通常试样要进行机加工。平行长度和夹持头部之间应以过渡弧连接，试样头部形状应适合于试验机夹头的夹持，如图 2-8 所示。圆形横截面试样的夹持端和平行长度之间的过渡弧的半径应不小于 $0.75d$，其他试样的夹持端和平行长度之间的过渡弧的半径应不小于 12mm。

如果相关产品标准有规定，型材、棒材等可以采用不经机加工的试样进行试验。

试样原始横截面积可以为圆形、方形、矩形或特殊情况时为其他形状。对于矩形横截面试样，推荐其宽厚比不超过 8∶1。

一般机加工的圆形横截面试样其平行长度的直径一般不应小于 3mm。

（2）试样的尺寸　试样的尺寸要求如下：

1）机械加工试样的平行长度 $L_c$ 应至少等于：①圆形横截面试样，$L_o + d_o/2$；②其他形状试样，$L_o + 1.5\sqrt{S_o}$；③对于仲裁试验，平行长度应为 $L_o + 2d_o$ 或 $L_o + 2\sqrt{S_o}$，除非材料尺寸不足够。

2）对于不经机加工试样的平行长度，试验机两夹头间的自由长度应足够，

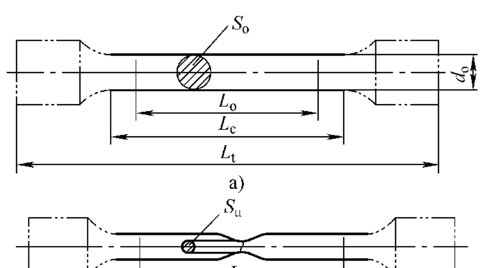



图 2-8　圆形横截面机加工试样

（试样头部仅为示意性）

a）试验前　b）试验后

$d_o$—圆试样平行长度的原始直径　$L_o$—原始标距

$L_c$—平行长度　$L_t$—试样总长度　$L_u$—断后标距

$S_o$—平行长度的原始横截面积　$S_u$—断后最小横截面积

以使试样原始标距的标记与最接近夹头间的距离不小于$\sqrt{S_o}$。

3）通常使用比例试样时，原始标距 $L_o$ 与原始横截面积 $S_o$ 有以下关系：

$$L_o = k\sqrt{S_o}$$

其中比例系数 $k$ 通常取值 5.65，也可以取 11.3。

圆形横截面比例试样和矩形横截面比例试样应优先采用表 2-5 和表 2-6 推荐的尺寸，在 $L_o$ 大于 15mm 的前提下，应优先采用 $L_o = 5d$ 的短比例试样；否则选用 $L_o = 10d$ 的长比例试样，若有需要，也可采用定标距试样。

**表 2-5　圆形横截面比例试样的尺寸**

| $d_o$/mm | $r$/mm | $k=5.65$ | | | $k=11.3$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样编号 | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样类型编号 |
| 25 | $\geqslant 0.75d_o$ | $5d_o$ | $\geqslant L_o + d_o/2$<br>仲裁试验：<br>$L_o + 2d$ | R1 | $10d_o$ | $\geqslant L_o + d_o/2$<br>仲裁试验：<br>$L_o + 2d_o$ | R01 |
| 20 | | | | R2 | | | R02 |
| 15 | | | | R3 | | | R03 |
| 10 | | | | R4 | | | R04 |
| 8 | | | | R5 | | | R05 |
| 6 | | | | R6 | | | R06 |
| 5 | | | | R7 | | | R07 |
| 3 | | | | R8 | | | R08 |

注：1. 如果相关产品标准无具体规定，优先采用 R2、R4 或 R7 试样。
　　2. 试样总长度取决于夹持方法，原则上 $L_t > L_c + 4d_o$。

**表 2-6　矩形横截面比例试样的尺寸**

| $b_o$/mm | $r$/mm | $k=5.65$ | | | $k=11.3$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样编号 | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样类型编号 |
| 12.5 | $\geqslant 12$ | $5.65\sqrt{S_o}$ | $\geqslant L_o + 1.5\sqrt{S_o}$<br>仲裁试验：<br>$L_o + 2\sqrt{S_o}$ | P7 | $11.3\sqrt{S_o}$ | $\geqslant L_o + 1.5\sqrt{S_o}$<br>仲裁试验：<br>$L_o + 2\sqrt{S_o}$ | P07 |
| 15 | | | | P8 | | | P08 |
| 20 | | | | P9 | | | P09 |
| 25 | | | | P10 | | | P010 |
| 30 | | | | P11 | | | P011 |

注：如果相关产品标准无具体规定，优先采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。

4）矩形横截面非比例试样尺寸如表 2-7 所示，如果相关的产品标准有规定，允许使用非比例试样。平行长度应不小于 $L_o + b_o/2$。对于仲裁试验，平行长度应为 $L_c = L_o + 2b_o$，除非材料尺寸不足够。

**表 2-7　矩形横截面非比例试样的尺寸**

| $b_o$/mm | $r$/mm | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样类型编号 |
|---|---|---|---|---|
| 12.5 | $\geqslant 20$ | 50 | $\geqslant L_o + 1.5\sqrt{S_o}$<br>仲裁试验：<br>$L_o + 2\sqrt{S_o}$ | P12 |
| 20 | | 80 | | P13 |
| 25 | | 50 | | P14 |
| 38 | | 50 | | P15 |
| 40 | | 200 | | P16 |

（3）试样的制备　试样的制备方法如下：

1）试样横向尺寸公差如表 2-8 所示。

表 2-8　试样横向尺寸公差　（单位：mm）

| 名　　称 | 名义横向尺寸 | 尺寸公差① | 几何公差② |
|---|---|---|---|
| 机加工的圆形横截面直径和四面机加工的矩形横截面试样横向尺寸 | ≥3<br>≤6 | ±0.02 | 0.03 |
| | >6<br>≤10 | ±0.03 | 0.04 |
| | >10<br>≤18 | ±0.05 | 0.04 |
| | >18<br>≤30 | ±0.10 | 0.05 |
| 相对两面机加工的矩形横截面试样横向尺寸 | ≥3<br>≤6 | ±0.02 | 0.03 |
| | >6<br>≤10 | ±0.03 | 0.04 |
| | >10<br>≤18 | ±0.05 | 0.06 |
| | >18<br>≤30 | ±0.10 | 0.12 |
| | >30<br>≤50 | ±0.15 | 0.15 |

① 如果试样的公差满足本表，原始横截面积可以用名义值，而不必通过实际测量再计算；如果试样的公差不满足本表，就很有必要对每个试样的尺寸进行实际测量。

② 沿着试样整个平行长度，规定横向尺寸测量值的最大最小之差。

2）对于表 2-8 给出的尺寸公差，例如对于名义直径 10mm 的试样，尺寸公差为 ±0.03mm，表示试样的直径不应超出下面两个值之间的尺寸范围：10mm + 0.03mm = 10.03mm，10mm − 0.03mm = 9.97mm，尺寸范围为 9.97 ~ 10.03mm。

3）对于表 2-8 中规定的几何公差，例如对于满足上述机加工条件的名义直径 10mm 的试样，沿其平行长度最大直径与最小直径之差不应超过 0.04mm。因此，如果试样的最小直径为 9.99mm，它的最大直径不应超过：9.99mm + 0.04mm = 10.03mm。

（4）原始横截面积的测定　原始横截面积的测定方法如下：

对于圆形横截面和四面机加工的矩形横截面试样，如果试样的尺寸公差和几何公差均满足表 2-8 的要求，可以用名义尺寸计算原始横截面积。对于所有其他类型的试样，应根据测量的原始试样尺寸计算原始横截面积 $S_o$，测量每个尺寸应准确到 ±0.5%。

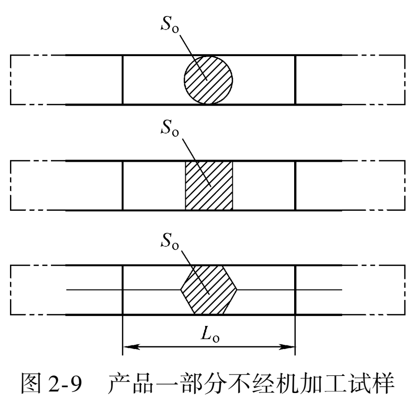



图 2-9　产品一部分不经机加工试样
（试样头部形状仅为示意性）
$L_o$—原始标距　$S_o$—平行长度的原始横截面积

**6. 直径或厚度 <4mm 的线材、棒材和型材使用的试样**

（1）试样的形状　试样通常为产品的一部分，不经机加工，如图 2-9 所示。

（2）试样的尺寸　原始标距 $L_o$ 应取 200mm ± 2mm 或 100mm ± 1mm。试验机两夹头之间的试样

长度应至少等于 $L_o+3b_o$ 或 $L_o+3d_o$，最小为 $L_o+20\text{mm}$，如表 2-9 所示。

**表 2-9　非比例试样**

| $d_o$ 或 $a_o$/mm | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样编号 |
|---|---|---|---|
| ≤4 | 100 | ≥120 | R9 |
| | 200 | ≥220 | R10 |

如果不测定断后伸长率，两夹头间的最小自由长度可以为 50mm。

（3）试样的制备　如果以盘卷交货的产品，可进行矫直。

（4）原始横截面积的测定　原始横截面积的测定应准确到 ±1%，对于圆形横截面的产品，应在两个相互垂直方向测量试样的直径，取其算术平均值计算横截面积。

可以根据测量的试样长度、试样质量和材料密度，按照下式确定其原始横截面积：

$$S_o=\frac{1000m}{\rho L_t}$$

式中　$m$——试样质量，单位为 g；

$L_t$——试样的总长度，单位为 mm；

$\rho$——试样材料密度，单位为 $g/cm^3$。

**7. 管材使用的试样**

（1）试样的形状　试样可以为全壁厚纵向弧形试样、管段试样、全壁厚横向试样或从管壁厚度机加工的圆形横截面试样，如图 2-10 和图 2-11 所示。

（2）纵向弧形试样　试样尺寸如表 2-10 所示。相关产品标准可以规定不同于

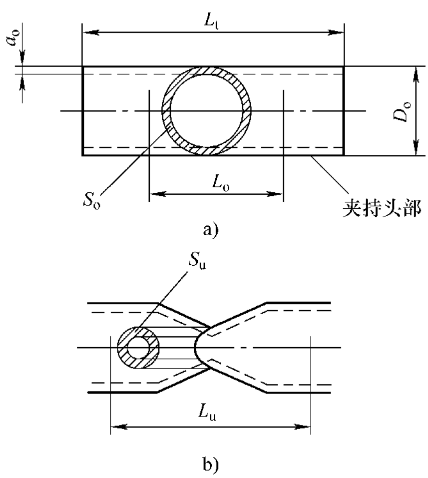



图 2-10　圆管管段试样（试样头部形状仅为示意性）

a）试验前　b）试验后

$a_o$—原始管壁厚度　$D_o$—原始管外直径

$L_o$—原始标距　$L_t$—试样总长度　$L_u$—断后标距

$S_o$—平行长度的原始横截面积

$S_u$—断后最小横截面积

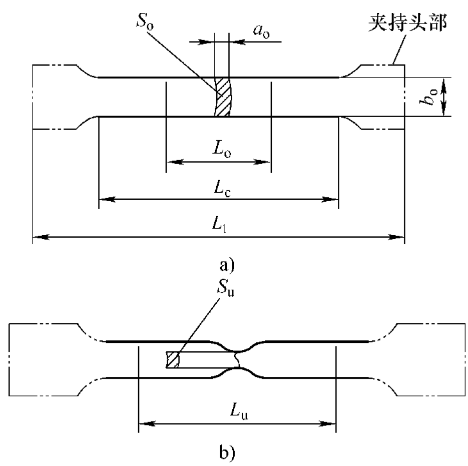



图 2-11　圆管的纵向弧形试样

a）试验前　b）试验后

$a_o$—原始管壁厚度　$b_o$—圆管纵向弧形试样原始宽度

$L_o$—原始标距　$L_c$—平行长度　$L_t$—试样总长度

$L_u$—断后标距　$S_o$—平行长度的原始横截面积

$S_u$—断后最小横截面积

表 2-10的试样。纵向弧形试样一般适用于管壁厚度大于 0.5mm 的管材。为了在试验机上夹持，可以压平纵向弧形试棒的两头部，但不应将平行长度部分压平。不带头部的试样，两夹头间的自由长度应足够，以使试样原始标距的标记与最接近的夹头间的距离不少于 $1.5\sqrt{S_o}$。

**表 2-10　纵向弧形试样的尺寸**

| $D_o$/mm | $b_o$/mm | $a_o$/mm | $r$/mm | $k=5.65$ | | | $k=11.3$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样编号 | $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样类型编号 |
| 30～50 | 10 | | | | | S1 | | | S01 |
| >50～70 | 15 | | | | $\geqslant L_o+1.5\sqrt{S_o}$ | S2 | | $\geqslant L_o+1.5\sqrt{S_o}$ | S02 |
| >70～100 | 20/19 | 原壁厚 | ≥12 | $5.65\sqrt{S_o}$ | 仲裁试验： | S3/S4 | $11.3\sqrt{S_o}$ | 仲裁试验： | S03 |
| >100～200 | 25 | | | | $L_o+2\sqrt{S_o}$ | S5 | | $L_o+2\sqrt{S_o}$ | |
| >200 | 38 | | | | | S6 | | | |

注：如果相关产品标准无具体规定，优先采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。

（3）管段试样　管段试样的尺寸如表 2-11 所示。应在试样两端加以塞头。塞头至最接近的标距标记的距离不应小于 $D_o/4$，只要材料足够，仲裁试验时此距离为 $D_o$。塞头相对于试验机夹头在标距方向伸出的长度不应超过 $D_o$，而其形状应不妨碍标距内的变形。允许压扁管段试样两夹持头部，加或不加扁块塞头后进行试验。仲裁试验不压扁，应加配塞头。

**表 2-11　管段试样的尺寸**

| $L_o$/mm | $L_c$/mm | 试样类型编号 |
|---|---|---|
| $5.65\sqrt{S_o}$ | $\geqslant L_o+D_o/2$<br>仲裁试验：$L_o+2D_o$ | S7 |
| 50 | ≥100 | S8 |

（4）机加工的横向试样　机加工的横向矩形横截面试样，管壁厚度小于 3mm 时，采用表 2-2 或表 2-3 的试样；管壁厚度大于或等于 3mm 时，采用表 2-6 或表 2-7 的试样。不带头的试样，两夹头间的自由长度应足够，以使试样原始标距的标记与最接近的夹头间的距离不小于 $1.5b_o$。应采用特别措施矫直横向试样。

（5）管壁厚度加工的纵向圆形横截面试样　机加工的纵向圆形横截面试样应采用表 2-5 的试样。相关产品标准应根据管壁厚度规定圆形横截面尺寸，如果无具体规定，按表 2-12 选定。

**表 2-12　管壁厚度机加工的纵向圆形横截面试样**

| $a_o$/mm | 采 用 试 样 |
|---|---|
| 8～13 | R7 |
| >13～16 | R5 |
| >16 | R4 |

（6）原始横截面积的测定　试样原始横截面积的测定应准确到 ±1%。管段试样、不带头的纵向或横向试样的原始横截面积可以根据测量的试样长度、试样质量和材料密度，按照下式计算：

$$S_o = \frac{1000m}{\rho L_t}$$

式中　$m$——试样的质量，单位为 g；

$L_t$——试样的总长度，单位为 mm；

$\rho$——试样的材料密度，单位为 g/cm³。

对于圆管纵向弧形试样，按照下式计算原始横截面积：

$$S_o = \frac{b_o}{4}(D_o^2 - b_o^2)^{1/2} + \frac{D_o^2}{4}\arcsin\left(\frac{b_o}{D_o}\right) - \frac{b_o}{4}[(D_o - 2a_o)^2 - b_o^2]^{1/2} - \left(\frac{D_o - 2a_o}{2}\right)^2 \arcsin\left(\frac{b_o}{D_o - 2a_o}\right)$$

式中　$a_o$——管的壁厚，单位为 mm；

$b_o$——纵向弧形试样的平均宽度，$b_o < (D_o - 2a_o)$，单位为 mm；

$D_o$——管的外径，单位为 mm。

下面两式为简化的公式，适用于纵向弧形试样：

1）当 $0.1 \leqslant b_o/D_o < 0.25$ 时：

$$S_o = a_o b_o \left[1 + \frac{b_o^2}{6D_o(D_o - 2a_o)}\right]$$

式中　$a_o$——管的壁厚，单位为 mm；

$b_o$——纵向弧形试样的平均宽度，$b_o < (D_o - 2a_o)$，单位为 mm；

$D_o$——管的外径，单位为 mm。

2）当 $b_o/D_o < 0.1$ 时：

$$S_o = a_o b_o$$

式中　$a_o$——管的壁厚，单位为 mm；

$b_o$——纵向弧形试样的平均宽度，$b_o < (D_o - 2a_o)$，单位为 mm。

对于管段试样，按照下式计算原始横截面积：

$$S_o = \pi a_o (D_o - a_o)$$

式中　$a_o$——管的壁厚，单位为 mm；

$D_o$——管的外径，单位为 mm。

## 2.2.2　试验设备

### 1. 电子万能试验机

电子万能试验机结构原理如图 2-12所示，它由测量系统、中横梁驱动系统及载荷机架三个部分组成。

（1）测量系统　主要是用以检测材料的承受载荷大小、试样的变形量及中横梁位移多少等。载荷测量是通过应变式载荷传感器及其放大器来实现的。电子万能试验机的特点之一是载荷测量范围宽，小自几克，大至

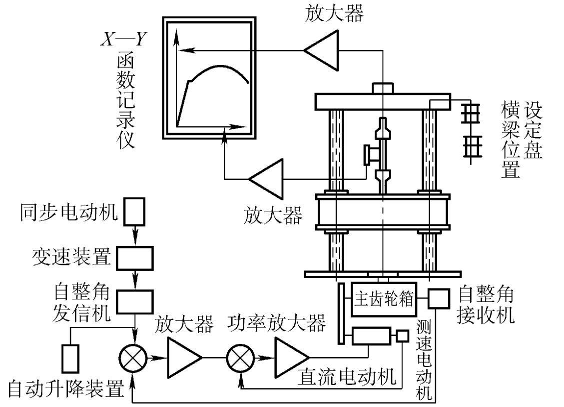



图 2-12　电子万能试验机结构原理图

上百吨，都可以满足精度指标要求。它一方面是通过更换不同量程的载荷传感器，另一方面是改变高性能载荷放大器的放大倍数来实现的。放大倍数一般分为 1、2、5、10、20、50、100 等，前六档与不同量程的传感器配合实现整机载荷量程的覆盖，以满足全载荷试验量程的覆盖。以 100kN 机为例，只选用四个载荷传感器就可以达到全载荷试验量程的要求，如表 2-13 所示。100kN 载荷传感器载荷范围为 2000～100000N，2000N 载荷传感器载荷范围 40～2000N，50N 载荷传感器载荷范围为 1～50N，1N 载荷传感器载荷范围为 0.05～1N，这样就实现了 0.05～100000N 的全部试验载荷的覆盖。

**表 2-13　力传感器容量与放大器档级的测量范围**　　（单位：N）

| 传感器容量/N | 载荷放大器档级 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| 100000 | 0～100000 | 0～50000 | 0～20000 | 0～10000 | 0～5000 | 0～2000 |
| 2000 | 0～2000 | 0～1000 | 0～400 | 0～200 | 0～100 | 0～40 |
| 50 | 0～50 | 0～25 | 0～10 | 0～5 | 0～2.5 | 0～1 |
| 1 | 0～1 | 0～0.5 | 0～0.2 | 0～0.1 | 0～0.05 | — |

电子载荷测量系统的特点是测量范围宽，精度高，响应快和操作方便。每次使用时，只要进行一次电气标定即可工作，传感器每年由计量部门检定一次。

试样变形的测量是通过引伸计及放大器构成应变测量系统实现的。引伸计规格齐全，其夹具有适应圆试样的，有适应板材试样的，还有适应线材、丝材、片材试样的。标距种类也很多，一般分为 100mm、50mm、25mm、12.5mm 等。为了扩大使用范围，通常用改变放大器的放大倍数来实现。一般放大器的放大倍数可分为 1、2、5、10 及 20 五个档级，从而减少了引伸计的规格种类。

（2）中横梁驱动系统　这一系统是由速度设定单元、伺服放大器、功率放大器、速度与位置检测器、直流伺服电动机及传动机构组成。由直流伺服电动机驱动主齿轮箱，带动丝杠使中横梁上下移动，结果实现了拉伸、压缩和各种循环试验。速度设定单元主要是给出了与速度相对应的准确模拟电压值或数字量，要求精度高稳定可靠，并且范围宽。通常为 1∶10000（0.05～500mm/min），1100 系列电子拉伸机速度范围最宽 1∶20000（0.05～1000mm/min）。伺服放大器的作用实际上是一个将速度给定信号、速度检侧信号、位置检侧信号及功率放大器的电流大小汇总在一起，按要求运算后发出指令去驱动功率放大器，进而使直流伺服电动机按预先给定速度转动。这一伺服控制系统有三个环路，即通常所说的速度、位置及电流反馈。采用了光电编码器之类的解析器作为检测元件的位置反馈系统是速度控制精度高的基本保证。

（3）载荷机架　从图 2-12 中看到，电子万能试验机的载荷机架包括上横梁、中横梁、台面和丝杠副。有的试验机（如 1185 型机）用两根圆柱与上横梁和台面构成框架，这两根圆柱作为中横梁上下运动的导向柱；也有的用槽钢与上横梁和台面构成框架，这样既保证了机架的刚度又使机架结构匀称合理。传动载荷的一对丝杠，有的试验机选用梯形丝杠，有的则为了提高传动效率选用了滚珠丝杠，而且丝杠与中横梁啮合处采用了消隙结构。这样使试验机在作全反复试验时，大大减少了载荷换向间隙，从而提高了传动精度。

**2. 试验机的技术要求**

试验机的测力系统应按照 GB/T 16825.1 进行校准，并且其准确度应为 1 级或优于 1 级。为了保证试验结果准确可靠，拉伸试验机应满足如下要求：

1）加力和卸力应平稳、无冲击和颤动。

2）测力示值误差不大于 ±1%，达到试验机检定的 1 级精度。

3）在更换不同摆锤时，指针的变动不大于 0.1 个分度。

4）试验保持时间不应少于 30s，在 30s 内力的示值变动范围应小于 0.4%。

5）试验机及其夹持装置应保证试样轴向受力。

试验机的技术要求应由政府计量管理部门或本单位的计量管理人员按有关规程检定。凡未经检定或检定不合格的试验机，严禁在生产及科研中使用。

**3. 引伸计的结构及选用**

引伸计是测量拉伸试样的微量变形，或者研究构件在外力作用下的线性变形所采用的仪器。引伸计一般由三部分组成：

（1）感受变形部分　用来直接与试样表面接触，以感受试样的变形。

（2）传递和放大部分　把所感受的变形加以放大的机构。

（3）指示部分　指示或记录变形大小的机构，有机械式和光学式两种。

应变式位移传感器主要由粘贴有应变片的弹性元件组成。在小应变条件下，弹性元件上的应变与所受外力成正比，也与弹性元件的变形成正比。如果在弹性元件的合适部位粘贴上应变片，并接成电桥形式，则可将弹性元件所感受的变形转换成电参量输出，再通过放大、显示或记录仪器就可以把变形量显示或记录下来。这种传感器的特点是精度高、线性好、装卸方便，试样断裂时，弹性元件能自动脱落，可用来测定拉伸全曲线。

引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160 的要求。测定上屈服强度、下屈服强度、屈服点延伸率、规定塑性延伸强度、规定总延伸强度、规定残余延伸强度及规定残余延伸强度的验证试验，应使用不低于 1 级准确度的引伸计；测定其他具有较大延伸率的性能，例如抗拉强度、最大力总延伸率和最大力塑性延伸率、断裂总延伸率及断后伸长率，应使用不低于 2 级准确度的引伸计。

### 2.2.3　试验内容及结果表示

**1. 设定试验力零点**

在试验加载链装配完成后，试样两端被夹持之前，应设定力测量系统的零点。一旦设定了力值零点，在试验期间力测量系统不能再发生变化。

上述方法一方面是为了确保夹持系统的重量在测力时得到补偿，另一方面是为了保证夹持过程中产生的力不影响力值的测量。

**2. 试样的夹持方法**

应使用如楔形夹头、螺纹夹头、平推夹头、套环夹具等合适的夹具夹持试样。

应尽最大努力确保夹持的试样受轴向拉力的作用，尽量减小弯曲。这对试验脆性材料或测定规定塑性延伸强度、规定总延伸强度、规定残余延伸强度或屈服强度时尤为

重要。

为了得到直的试样和确保试样与夹头对中，可以施加不超过规定强度或预期屈服强度的5%相应的预拉力。宜对预拉力的延伸影响进行修正。

**3. 第一种应变速率控制的试验速率**（方法 A）

（1）一般要求　第一种方法是为了减小测定应变速率敏感参数（性能）时的试验速率变化和试验结果的测量不确定度，包含两种不同类型的应变速率控制模式。第一种应变速率 $\dot{e}_{L_e}$是基于引伸计的反馈而得到；第二种是根据平行长度估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$，即通过控制平行长度与需要的应变速率相乘得到的横梁位移速率来实现。

如果材料显示出均匀变形能力，力值能保持名义的恒定，应变速率 $\dot{e}_{L_e}$和根据平行长度估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$大致相等。如果材料展示出不连续屈服或锯齿状屈服或发生缩颈时，两种速率之间会存在不同。随着力值的增加，试验机的柔度可能会导致实际的应变速率明显低于应变速率的设定值。

试验速率应满足下列要求：

1）在直至测定 $R_{eH}$、$R_p$ 或 $R_t$ 的范围，应采用规定的应变速率 $\dot{e}_{L_e}$。这一范围需要在试样上装夹引伸计，消除拉伸试验机柔度的影响，以准确控制应变速率（对于不能进行应变速率控制的试验机，根据平行长度部分估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$也可用）。

2）对于不连续屈服的材料，应选用根据平行长度部分估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$。这种情况下是不可能用装夹在试样上的引伸计来控制应变速率的，因为局部的塑性变形可能发生在引伸计标距以外。在平行长度范围，利用恒定的横梁位移速率 $v_c$，根据下式计算得到的应变速率具有足够的准确度。

$$v_c = L_c \dot{e}_{L_c}$$

式中　$\dot{e}_{L_c}$——平行长度估计的应变速率，单位为 $s^{-1}$；

$L_c$——平行长度，单位为 mm。

3）在测定 $R_p$、$R_t$ 或屈服结束之后，应该使用 $\dot{e}_{L_e}$或 $\dot{e}_{L_c}$。为了避免由于缩颈发生在引伸计标距以外控制出现问题，推荐使用 $\dot{e}_{L_c}$。

在测定相关材料性能时，应保持规定的应变速率，如图 2-13 所示。

在进行应变速率或控制模式转换时，不应在应力-延伸率曲线上引入不连续性，而歪曲 $R_m$、$A_g$ 或 $A_{gt}$值（见图 2-2）。这种不连续效应可以通过降低转换速率得以减轻。

应力-延伸率曲线在加工硬化阶段的形状可能受应变速率的影响。采用的试验速率应通过技术文件来规定。

（2）上屈服强度 $R_{eH}$或规定延伸强度 $R_p$、$R_t$ 和 $R_r$ 的测定　当测定上屈服强度 $R_{eH}$或规定延伸强度 $R_p$、$R_t$ 和 $R_r$ 时，应变速率 $\dot{e}_{L_e}$应保持恒定。在测定这些性能时，$\dot{e}_{L_e}$应选用下面两个范围之一：

1）范围 1：$\dot{e} = 0.00007s^{-1}$，相对误差 ±20%。

2）范围 2：$\dot{e} = 0.00025s^{-1}$，相对误差 ±20%（如果没有其他规定，推荐选取该速率）。

如果试验机不能直接进行应变速率控制，应该采用通过平行长度估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$，即恒定的横梁位移速率。该速率应用下式进行计算：

$$v_c = L_c \times \dot{e}_{L_c}$$

式中　$\dot{e}_{L_c}$——平行长度估计的应变速率，单位为 $s^{-1}$；

$L_c$——平行长度，单位为 mm。

上式没有考虑试验装置（机架、力传感器、夹具等）的弹性变形。这意味着应将变形分为试验装置的弹性变形和试样的弹性变形。横梁位移速率只有一部分转移到了试样上。试样上产生的应变速率 $\dot{e}_m$ 由下式给定：

$$\dot{e}_m = v_c / \left(\frac{mS_o}{C_M} + L_c\right)$$

式中　$C_M$——试验装置的刚度，单位为 mm/N（在试验装置的刚度不是线性的情况下，比如楔形夹头，应取相关参数点例如 $R_{p0.2}$ 附近的刚度值）；

$\dot{e}_m$——试样上产生的应变速率，单位为 $s^{-1}$；

$L_c$——试样的平行长度，单位为 mm；

$m$——给定时刻应力-延伸曲线的斜率（例如 $R_{p0.2}$ 附近点），单位为 MPa；

$S_o$——原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$v_c$——横梁位移速率，单位为 mm/s。

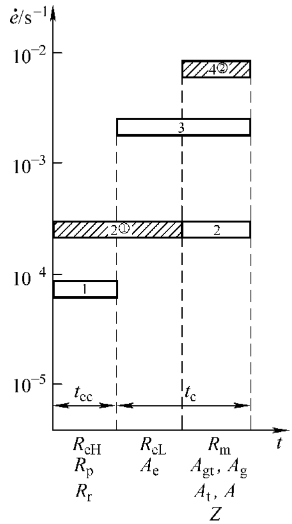



图 2-13　应变速率范围（方法 A）

$\dot{e}$—应变速率

$t$—拉伸试验时间进程　$t_c$—横梁控制时间

$t_{ec}$—引伸计控制时间或横梁控制时间

1—范围 1：$\dot{e}$ = 0.00007 $s^{-1}$，相对误差 ±20%

2—范围 2：$\dot{e}$ = 0.00025 $s^{-1}$，相对误差 ±20%

3—范围 3：$\dot{e}$ = 0.0025 $s^{-1}$，相对误差 ±20%

4—范围 4：$\dot{e}$ = 0.0067 $s^{-1}$，相对误差 ±20%

①推荐的。

②如果试验机不能测量或控制应变速率，可扩展至较低速率的范围。

注：从应力-应变曲线弹性部分得到的 $m$ 和 $C_M$ 不能用。

$v_c = L_c \dot{e}_{L_c}$ 不能补偿柔度效应，试样上产生应变速率 $\dot{e}_m$ 所需近似横梁位移速率可以根据下式计算得到：

$$v_c = \dot{e}_m \left(\frac{mS_o}{C_M} + L_c\right)$$

（3）下屈服强度 $R_{eL}$ 和屈服点延伸率 $A_e$ 的测定　上屈服强度之后，在测定下屈服强度和屈服点延伸率时，应当保持下列两种范围之一的平行长度估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$，直到不连续屈服。

1）范围 2：$\dot{e}$ = 0.00025 $s^{-1}$，相对误差 ±20%（测定 $R_{eL}$ 时推荐该速率）。

2）范围 3：$\dot{e}$ = 0.0025 $s^{-1}$，相对误差 ±20%。

（4）抗拉强度 $R_m$、断后伸长率 $A$、最大力下的总延伸率 $A_{gt}$、最大力下的塑性延伸率 $A_g$ 和断面收缩率 $Z$ 的测定　在屈服强度或塑性延伸强度测定后，根据试样平行长度估计的应变速率 $\dot{e}_{L_c}$，应转换成下述规定范围之一的应变速率：

1）范围 2：$\dot{e}=0.00025s^{-1}$，相对误差 ±20%。

2）范围 3：$\dot{e}=0.0025s^{-1}$，相对误差 ±20%。

3）范围 4：$\dot{e}=0.0067s^{-1}$，相对误差 ±20%（如果没有其他规定，推荐选取该速率）。

如果拉伸试验仅仅是为了测定抗拉强度，根据范围 3 或范围 4 得到的平行长度估计的应变速率适用于整个试验。

**4. 第二种应变速率控制的试验速率（方法 B）**

（1）一般要求　试验速率取决于材料特性并应符合下列要求。如果没有其他规定，在应力达到规定屈服强度的一半之前，可以采用任意的试验速率。在测定相关材料性能时，应保持规定的应变速率，如图 2-14 所示。

（2）上屈服强度 $R_{eH}$　在弹性范围和直至上屈服强度，试验机夹头的分离速率应尽可能保持恒定并在表 2-14 规定的应力速率范围内。弹性模量小于 150000MPa 的典型材料包括锰、铝合金、铜和钛。弹性模量大于 150000MPa 的典型材料包括铁、钢、钨和镍基合金。

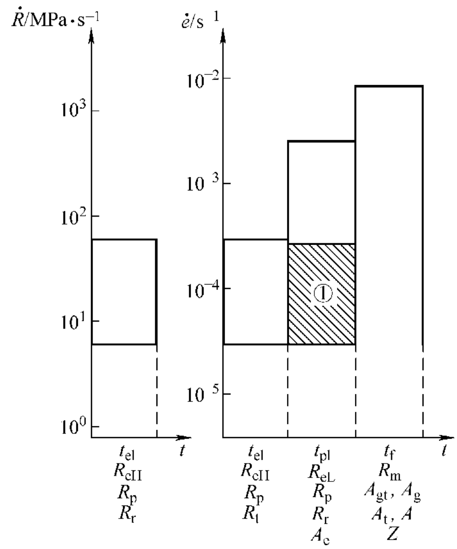



图 2-14　应变速率范围（方法 B）

$\dot{e}$—应变速率　$\dot{R}$—应力速率　$t$—拉伸试验时间进程

$t_{el}$—测定弹性性能参数的时间范围

$t_f$—测定通常到断裂的性能参数的时间范围

$t_{pl}$—测定塑性性能参数的时间范围

① 如果试验机不能测量或控制应变速率，可扩展至较低速率的范围。

**表 2-14　应力速率**

| 材料弹性模量 $E$/MPa | 应力速率 $\dot{R}$/(MPa/s) | |
|---|---|---|
| | 最小 | 最大 |
| <150000 | 2 | 20 |
| ≥150000 | 6 | 60 |

（3）下屈服强度 $R_{eL}$　如果仅测定下屈服强度，在试样平行长度的屈服期间应变速率应在 0.00025～0.0025/s 之间。平行长度内的应变速率应尽可能保持恒定。如果不能直接调节这一应变速率，应通过调节屈服即将开始前的应力速率来调整，在屈服完成之前不再调节试验机的控制。

任何情况下，弹性范围内的应力速率不得超过表 2-14 规定的最大速率。

（4）规定塑性延伸强度 $R_p$、规定总延伸强度 $R_t$ 和规定残余延伸强度 $R_r$　在弹性范围试验机的横梁位移速率应在表 2-14 规定的应力速率范围内，并尽可能保持恒定。

在塑性范围和直至规定强度（规定塑性延伸强度、规定总延伸强度和规定残余延伸强度）应变速率不应超过 0.0025/s。

（5）横梁位移速率　如果试验机无能力测量或控制应变速率，应采用等效于表 2-14规定的应力速率的试验机横梁位移速率直至屈服完成。

（6）抗拉强度 $R_m$、断后伸长率 $A$、最大力总延伸率 $A_{gt}$、最大力塑性延伸率 $A_g$ 和断

面收缩率 $Z$　测定屈服强度或塑性延伸强度后，试验速率可以增加到不大于 $0.008s^{-1}$ 的应变速率（或等效的横梁分离速率）。

如果仅仅需要测定材料的抗拉强度，在整个试验过程中可以选取不超过 0.008/s 的单一试验速率。

**5. 试验条件的表示**

为了用缩略的形式报告试验控制模式和试验速率，可以使用下列缩写的表示形式：

GB/T 228.1Annn 或 GB/T 228.1Bn

这里“A”定义为使用方法 A（应变速率控制），“B”定义为使用方法 B（应力速率控制）。三个字母的符号“nnn”是指每个试验阶段所用速率，如图 2-13 和图 2-14 中定义的。方法 B 中的符号“n”是指在弹性阶段所选取的应力速率。

示例 1：GB/T 228.1A224 表示试验为应变速率控制，不同阶段的试验速率范围分别为 2/s、2/s 和 4/s。

示例 2：GB/T 228.1B30 表示试验为应力速率控制，试验的名义应力速率为 30MPa/s。

示例 3：GB/T 228.1B 表示试验为应力速率控制，试验的名义应力速率符合表 2-14。

**6. 原始标距的标记**

应用小标记、细画线或细墨线标记原始标距，但不得用引起过早断裂的缺口作标记。

对于比例试样，如果原始标距的计算值与其标记值之差小于 $10\% L_o$，可将原始标距的计算值按 GB/T 8170 修约至最接近 5mm 的倍数。原始标距的标记应准确到 ±1%。如果平行长度 $L_c$ 比原始标距长许多，例如不经机加工的试样，可以标记一系列套叠的原始标距。有时，可以在试样表面画一条平行于试样纵轴的线，并在此线上标记原始标距。

**7. 屈服强度的测定**

（1）上屈服强度 $R_{eH}$　上屈服强度 $R_{eH}$ 可以从力-延伸曲线图或峰值力显示器上测得，定义为力首次下降前的最大力值对应的应力（见图 2-3）。

（2）下屈服强度 $R_{eL}$　下屈服强度 $R_{eL}$ 可以从力-延伸曲线上测得，定义为不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小力所对应的应力（见图 2-3）。

（3）位置判定　对于上、下屈服强度位置判定的基本原则如下：

1）屈服前的第 1 个峰值应力（第 1 个极大值应力）判为上屈服强度，不管其后的峰值应力比它大还是比它小。

2）屈服阶段中如呈现两个或两个以上的谷值应力，舍去第 1 个谷值应力（第 1 个极小值应力）不计，取其余谷值应力中之最小者判为下屈服强度。如果只呈现 1 个下降谷，此谷值应力判为下屈服强度。

3）屈服阶段中呈现屈服平台，平台应力判为下屈服强度。如果呈现多个而且后者高于前者的屈服平台，判第 1 个平台应力为下屈服强度。

4）正确的判定结果应是下屈服强度一定低于上屈服强度。

为提高试验效率，可以报告在上屈服强度之后延伸率为 0.25% 范围以内的最低应

力为下屈服强度，不考虑任何初始瞬时效应。用此方法测定下屈服强度后，试验速率可以增加。试验报告应注明使用了此简捷方法。此规定仅仅适用于呈现明显屈服的材料和不测定屈服点延伸率的情况。

**8. 抗拉强度的测定**

对于呈现明显屈服（不连续屈服）现象的金属材料，从记录的力-延伸或力-位移曲线图，或从测力度盘读取过了屈服阶段之后的最大力，如图 2-15 所示。对于呈现无明显屈服（连续屈服）现象的金属材料，从记录的力-延伸或力-位移曲线图，或从测力度盘读取试验过程中的最大力 $F_m$。最大力除以试样原始横截面积（$S_o$）得到抗拉强度。

对于显示特殊屈服现象的材料，相应于上屈服点的应力可能高于此后任一应力值（第二极大值，如图 2-16 所示）。如遇此种情况，需要选定两个极大值中之一作为抗拉强度。

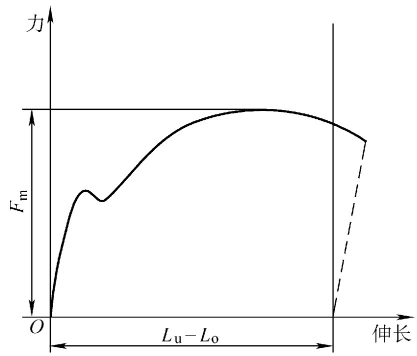



图 2-15　最大力 $F_m$

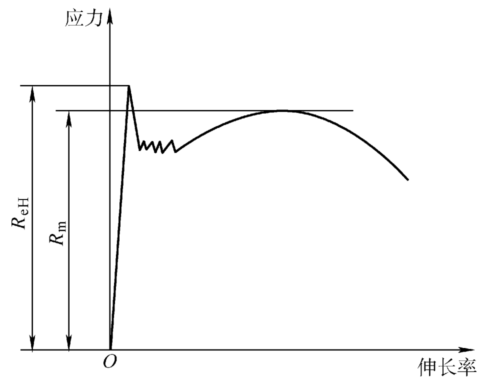
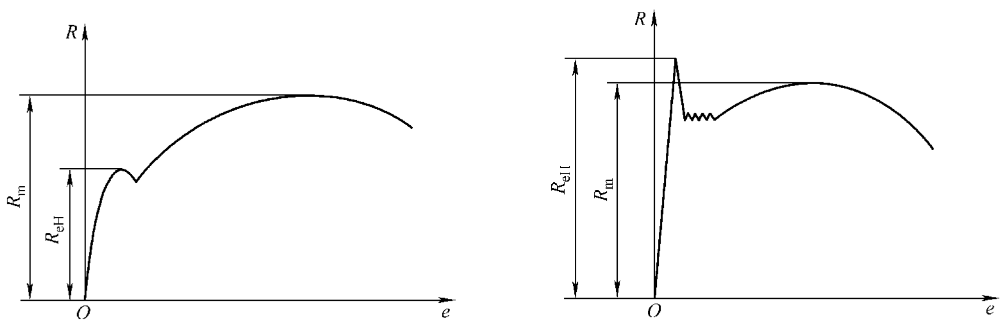



图 2-16　出现特殊屈服现象材料的抗拉强度

从应力-延伸率曲线测定抗拉强度 $R_m$ 的几种不同类型如图 2-17 所示。




a)　　b)

图 2-17　从应力-延伸率曲线测定抗拉强度

a）$R_{eH} < R_m$　b）$R_{eH} > R_m$

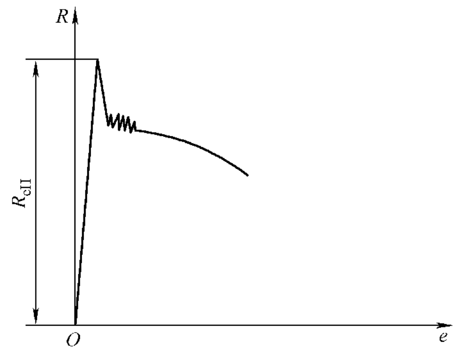



图 2-17　从应力-延伸率曲线测定抗拉强度（续）

c）应力-延伸率状态的特殊情况

**9. 规定塑性延伸强度的测定**

（1）定义法　根据力-延伸曲线图测定规定塑性延伸强度 $R_p$。在曲线图上，作一条与曲线的弹性直线段部分平行，且在延伸轴上与此直线段的距离等效于规定塑性延伸率，例如 0.2% 的直线。此平行线与曲线的交截点给出相应于所求规定塑性延伸强度的力。此力除以试样原始横截面积 $S_o$ 得到规定塑性延伸强度，如图 2-4 所示。

如力-延伸曲线图的弹性直线部分不能明确地确定，以致不能以足够的准确度作出这一平行线，推荐采用如下方法，如图 2-18 所示。

试验时，当已超过预期的规定塑性延伸强度后，将力降至约为已达到的力的 10%，然后再施加力直至超过原已达到的力。为了测定规定塑性延伸强度，过滞后环两端点画一直线，然后经过横轴上与曲线原点的距离等效于所规定塑性延伸率的点，作平行于此直线的平行线。

平行线与曲线的交截点给出相应于规定塑性延伸强度的力。此力除以试样原始横截面积得到规定塑性延伸强度，如图 2-18 所示。

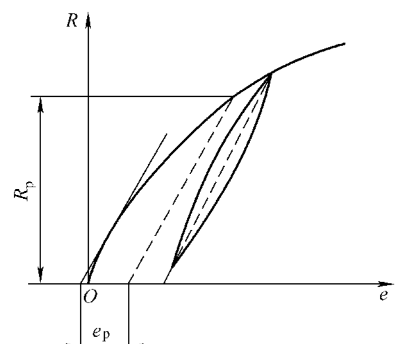



图 2-18　规定塑性延伸强度 $R_p$

$e$—延伸率　$e_p$—规定塑性延伸率

$R$—应力　$R_p$—规定塑性延伸强度

1）可以用各种方法修正曲线的原点。作一条平行于滞后环所确定的直线的平行线并使其与力-延伸曲线相切，此平行线与延伸率轴的交截点即为曲线的修正原点。

2）在力降低开始点的塑性应变只略微高于规定塑性延伸强度 $R_p$。较高应变的开始点将会降低通过滞后环获得直线的斜率。

3）如果在产品标准中没有规定或得到客户的同意，在不连续屈服期间或之后测定规定塑性延伸强度是不合适的。

（2）逐步逼近法　逐步逼近法适用于具有无明显弹性直线段金属材料的规定塑性

延伸强度的测定，也适用于力-延伸曲线图具有弹性直线段高度不低于 $0.5F_m$ 的金属材料，其塑性延伸强度的测定亦适用。

试验时，记录力-延伸曲线图，至少直至超过预期的规定塑性延伸强度的范围。在力-延伸曲线上任意估取 $A_o$ 点拟为规定塑性延伸率等于 0.2% 时的力 $F^0_{p0.2}$，在曲线上分别确定力为 $0.1F^0_{p0.2}$ 和 $0.5F^0_{p0.2}$ 的 $B_1$ 和 $D_1$ 两点，作直线 $B_1D_1$。从曲线原点 $O$（必要时进行原点修正）起截取 $OC$ 段（$OC=0.2\%L_en$，式中 $n$ 为延伸放大倍数），过 $C$ 点作平行于 $B_1D_1$ 的平行线 $CA_1$ 交曲线于 $A_1$ 点。如果 $A_1$ 与 $A_o$ 重合，$F^0_{p0.2}$ 即为相应于规定塑性延伸率为 0.2% 时的力。

如果 $A_1$ 点未与 $A_o$ 重合，需要按照上述步骤进行进一步逼近。此时，取 $A_1$ 点的力 $F^1_{p0.2}$，在曲线上分别确定力为 $0.1F^1_{p0.2}$ 和 $0.5F^1_{p0.2}$ 的 $B_2$ 和 $D_2$ 两点，作直线 $B_2D_2$。过 $C$ 点作平行于 $B_2D_2$ 的平行线 $CA_2$ 交曲线于 $A_2$ 点。如此逐步逼近，直至最后一次得到的交点 $A_n$ 与前一次的交点 $A_{n-1}$ 重合，如图 2-19 所示。$A_n$ 的力即为规定塑性延伸率达 0.2% 时的力。此力除以试样原始横截面积得到测定的规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$。

最终得到的直线 $B_nD_n$ 的斜率，一般可以作为确定其他规定塑性延伸强度的基准斜率。

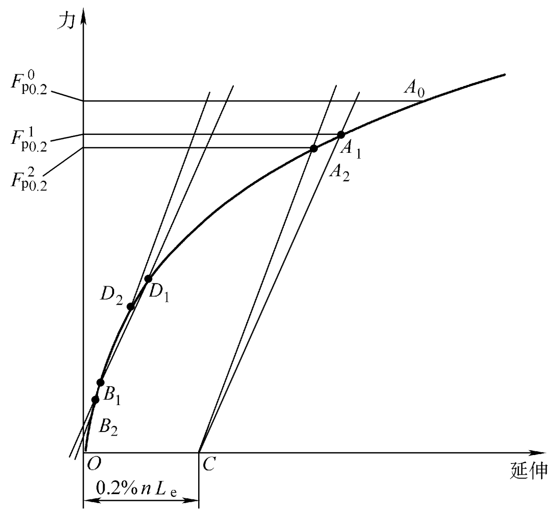



图 2-19 逐步逼近法测定规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$

逐步逼近法测定软铝等强度很低的材料的规定塑性延伸强度时显示出不适合性。

**10. 规定总延伸强度的测定**

在力-延伸曲线图上，作一条平行于力轴并与该轴的距离等效于规定总延伸率的平行线，此平行线与曲线的交截点给出相应于规定总延伸强度的力，此力除以试样原始横截面积 $S_o$ 得到规定总延伸强度 $R_t$，如图 2-5 所示。

**11. 规定残余延伸强度的验证和测定**

（1）一般要求　试样施加相应于规定残余延伸强度的力，保持力 10～12s，卸除力后验证残余延伸率未超过规定百分率，如图 2-6 所示。

这是检查通过或未通过的试验，通常不作为拉伸试验的一部分。对试样施加应力，允许的残余延伸由相关产品标准（或试验委托方）来规定。例如：报告“$R_{r0.5}$ = 750MPa 通过”意思是对试样施加 750MPa 的应力，产生的残余延伸小于等于 0.5%。

（2）卸力方法测定规定残余延伸强度 $R_{r0.2}$ 举例　示例如下：

1）试验材料：钢，预期的规定残余延伸强度 $R_{r0.2}\approx800$MPa。

2）试样尺寸：$d=10.00$mm，$S_o=78.54\text{mm}^2$。

3）引伸计：表式引伸计，1 级准确度，$L_e=50$mm，每一分度值为 0.01mm。

4）试验机：最大量程 200kN，选用度盘为 100kN。

5）按照预期的规定残余延伸强度计算相应于应力值 5% 的预拉力为：

$F_o = R_{r0.2} S_o \times 5\% = 6283.2\text{N}$，化整后取 6000N。此时，引伸计的条件零点为 1 分度。

6）使用的引伸计标距为 50mm，测定规定残余延伸强度 $R_{r0.2}$ 所要达到的残余延伸应为：50mm × 0.2% = 0.1mm。将其折合成引伸计的分度数为：（0.1 ÷ 0.01）分度 = 10 分度。

7）从 $F_o$ 起第一次施加力直至试样在引伸计标距的长度上产生总延伸（相应于引伸计的分度数）应为：［10 +（1 ~ 2）］分度 = 11 ~ 12 分度，由于条件零点为 1 分度，总计为 13 分度，保持力 10 ~ 12s 后，将力降至 $F_o$，引伸计读数为 2.3 分度，即残余延伸为 1.3 分度。

8）第二次施加力直至引伸计达到读数应为：在上一次读数 13 分度的基础上，加上规定残余延伸 10 分度与已得残余延伸 1.3 分度之差，再加上 1 ~ 2 分度，即［13 +（10 − 1.3）+ 2］分度 = 23.7 分度。保持力 10 ~ 20s，将力降至 $F_o$ 后得到 7.3 分度的残余延伸读数。

9）第三次施加力直至引伸计达到的读数应为：［23.7 +（10 − 7.3）+ 1］分度 = 27.4 分度。

10）试验直至残余延伸读数达到或稍微超过 10 分度为止，试验记录如表 2-15 所示。

**表 2-15　力-残余延伸数据记录**

| 力/N | 施加力引伸计读数/分度 | 预拉力引伸计读数/分度 | 残余延伸/分度 |
|---|---|---|---|
| 6000 | 1.0 | — | — |
| 41000 | 13.0 | 2.3 | 1.3 |
| 57000 | 23.7 | 8.3 | 7.3 |
| 61000 | 27.4 | 10.7 | 9.7 |
| 62000 | 28.7 | 11.5 | 10.5 |

11）规定残余延伸强度 $R_{r0.2}$ 计算如下：

由表 2-15 查出残余延伸读数最接近 10 分度的力值读数为 61000N，即测定的规定残余延伸力应在 61000 和 62000N 之间。用线性内插法求得规定残余延伸力为

$$F_{r0.2} = \frac{(10.5 - 10) \times 61000 + (10 - 9.7) \times 62000}{(10.5 - 9.7)}\text{N} = 61375\text{N}$$

$$R_{r0.2} = \frac{61375}{78.54}\text{MPa} = 781.4\text{MPa}$$

修约后结果为：$R_{r0.2} = 781\text{MPa}$。

**12. 屈服点延伸率的测定**

对于不连续屈服的材料，从力-延伸图上均匀加工硬化开始点的延伸减去上屈服强度 $R_{eH}$ 对应的延伸得到屈服点延伸 $A_e$。均匀加工硬化开始点的延伸通过在曲线图上，经过不连续屈服阶段最后的最小值点作一条水平线或经过均匀加工硬化前屈服范围的回归线，与均匀加工硬化开始处曲线的最高斜率线相交点确定。屈服点延伸除以引伸计标距 $L_e$ 得到

屈服点延伸率，如图 2-20 所示。试验报告应注明确定均匀加工硬化开始点的方法。

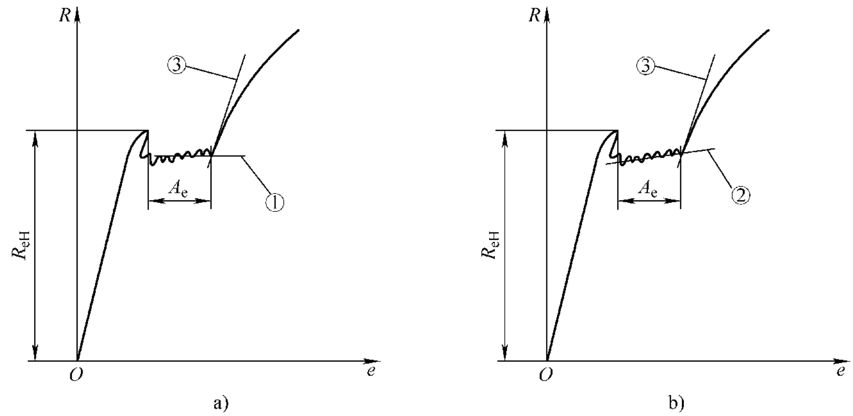



图 2-20　屈服点延伸率 $A_e$ 的不同评估方法

a）水平线法　b）回归线法

$A_e$—屈服点延伸率　$e$—延伸率　$R$—应力　$R_{eH}$—上屈服强度

① 经过均匀加工硬化前最后最小值点的水平线。

② 经过均匀加工硬化前屈服范围的回归线。

③ 均匀加工硬化开始处曲线的最高斜率线。

**13. 最大力塑性延伸率的测定**

在用引伸计得到的力-延伸曲线图上，从最大力时的总延伸中扣除弹性延伸部分即得到最大力时的塑性延伸，将其除以引伸计标距得到最大力塑性延伸率。

最大力塑性延伸率 $A_g$ 按照下式进行计算：

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{E}\right) \times 100\%$$

式中　$A_g$——最大力塑性延伸率（%）；

$L_e$——引伸计标距，单位为 mm；

$E$——弹性模量，单位为 MPa；

$R_m$——抗拉强度，单位为 MPa；

$\Delta L_m$——最大力下的延伸，单位为 mm。

有些材料在最大力时呈现一平台。当出现这种情况，取平台中点的最大力对应的塑性延伸率。

**14. 最大力总延伸率的测定**

在用引伸计得到的力-延伸曲线图上测定最大力总延伸。最大力总延伸率 $A_{gt}$ 按照下式计算：

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \times 100\%$$

式中　$A_{gt}$——最大力总延伸率（%）；

$L_e$——引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta L_m$——最大力下的延伸，单位为 mm。

有些材料在最大力时呈现一平台。当出现这种情况，取平台中点的最大力对应的总延伸率。

**15. 断裂总延伸率的测定**

在用引伸计得到的力-延伸曲线图上测定断裂总延伸。断裂总延伸率 $A_t$ 按照下式计算：

$$A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} \times 100\%$$

式中　$A_t$——断裂总延伸率（%）；

$L_e$——引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta L_f$——断裂总延伸，单位为 mm。

**16. 断后伸长率的测定**

（1）断后伸长率不小于 5% 的测定方法　测定方法如下：

1）为了测定断后伸长率，应将试样断裂的部分仔细地配接在一起使其轴线处于同一直线上，并采取特别措施确保试样断裂部分适当接触后测量试样断后标距。这对小横截面试样和低伸长率试样尤为重要。按下式计算断后伸长率 $A$：

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$A$——断后伸长率（%）；

$L_o$——原始标距，单位为 mm；

$L_u$——断后标距，单位为 mm。

应使用分辨力足够的量具或测量装置测定断后伸长量（$L_u - L_o$），并准确到 ±0.25mm。

2）如果规定的最小断后伸长率小于 5%，建议采取特殊方法进行测定。原则上只有断裂处与最接近的标距标记的距离不小于原始标距的 1/3 情况方为有效。但断后伸长率大于或等于规定值，不管断裂位置处于何处测量均为有效。如果断裂处与最接近的标距标记的距离小于原始标距的 1/3，可采用移位法测定断后伸长率。

3）能用引伸计测定断裂延伸的试验机，引伸计标距应等于试样原始标距，无需标出试样原始标距的标记。以断裂时的总延伸作为伸长测量时，为了得到断后伸长率，应从总延伸中扣除弹性延伸部分。为了得到与手工方法可比的结果，有一些额外的要求（如引伸计高的动态响应和频带宽度）。原则上，断裂发生在引伸计标距 $L_e$ 以内方为有效，但断后伸长率等于或大于规定值，不管断裂位置处于何处测量均为有效。如果产品标准规定用一固定标距测定断后伸长率，引伸计标距应等于这一标距。

4）仅当标距或引伸计标距、横截面的形状和面积均相同时，或当比例系数 $k$ 相同时，断后伸长率才具有可比性。

（2）断后伸长率小于 5% 的测定方法　在测定小于 5% 的断后伸长率时应加倍小心。

一般采用的方法如下：

试验前在平行长度的两端处做一很小的标记。使用调节到标距的分规，分别以标记为圆心画一圆弧。拉断后，将断裂的试样置于一装置上，最好借助螺钉施加轴向力，以使其在测量时牢固地对接在一起。以最接近断裂的原圆心为圆心，以相同的半径画第二个圆弧，如图 2-21 所示。用工具显微镜或其他合适的仪器测量两个圆弧之间的距离即为断后伸长，准确到 ±0.02mm。为使画线清晰可见，试验前涂上一层染料。

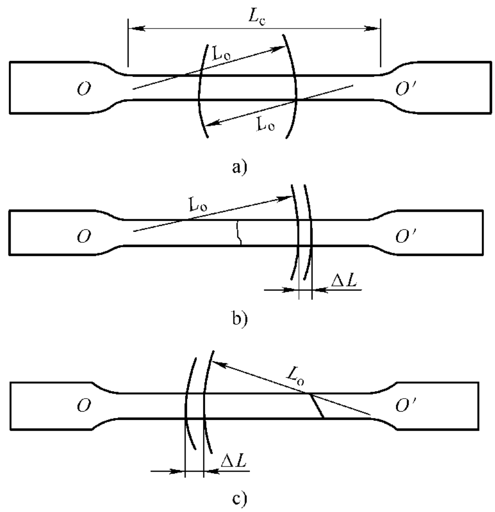



图 2-21　断后伸长率小于 5% 的测定方法
a）拉断前画弧　b）断裂后第 1 次画弧
c）断裂后第 2 次画弧

（3）移位法测断后伸长率　测定方法如下：

1）试验前将原始标距细分为 5 ~ 10mm 的 $N$ 等份。

2）试验后，以符号 $X$ 表示断裂后试样短段的标距标记，以符号 $Y$ 表示断裂试样长段的等分格标记，此标记与断裂处的距离最接近于断裂处至标距标记 $X$ 的距离，$X$ 与 $Y$ 之间的分格数记为 $n$。

3）如 $N-n$ 为偶数，如图 2-22a 所示，测量 $X$ 与 $Y$ 之间的距离 $l_{XY}$ 和测量从 $Y$ 至距离为 $(N-n)/2$ 个分格的 $Z$ 标记之间的距离。按照下式计算断后伸长率：

$$A=\frac{l_{XY}+2l_{YZ}-L_o}{L_o}\times100\%$$

式中　$L_o$——原始标距，单位为 mm。

4）如 $N-n$ 为奇数，如图 2-22b 所示，测量 $X$ 与 $Y$ 之间的距离和测量从 $Y$ 至距离为 $(N-n-1)/2$ 和 $(N-n+1)/2$ 个分格的 $Z'$ 和 $Z''$ 标记之间的距离 $l_{YZ'}$ 和 $l_{YZ''}$。按照下式计算断后伸长率：

$$A=\frac{l_{XY}+l_{YZ'}+l_{YZ''}-L_o}{L_o}\times100\%$$

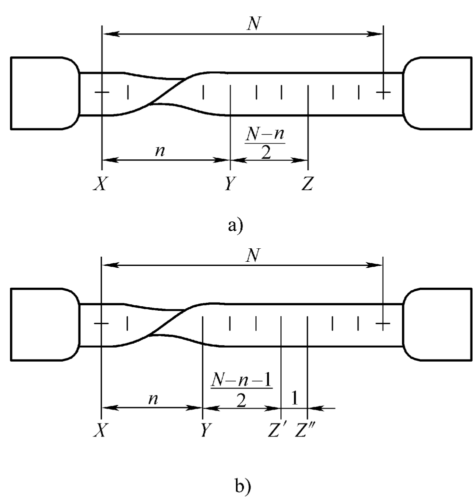



图 2-22　移位法图示说明
（试样头部仅为示意性）
a）$N-n$ 为偶数　b）$N-n$ 为奇数

（4）棒材、线材和条材等长产品的无缩颈塑性伸长率 $A_{wn}$ 的测定方法　该方法是测量已拉伸试验过的试样最长部分。

试验前，在标距上标出等分格标记，连续两个等分格标记之间的距离等于原始标距 $L_o'$ 的约数。原始标距 $L_o'$ 的标记应准确

到 ±0.5mm 以内。断裂后，在试样的最长部分上测量断后标距 $L'_u$，准确到 ±0.5mm。

为使测量有效，应满足以下条件：

1）测量区的范围应处于距离断裂处至少 $5d_o$ 和距离夹头至少为 $2.5d_o$。如果试样横截面为不规则图形，$d_o$ 为不规则截面外接圆的直径。

2）测量用的原始标距应至少等于产品标准中规定的值。

无缩颈塑性伸长率按下式计算：

$$A_{wn}=\frac{L'_u-L'_o}{L'_o}\times 100\%$$

式中　$A_{wn}$——无缩颈塑性伸长率（%）；

$L'_u$——断后标距，单位为 mm；

$L'_o$——原始标距，单位为 mm。

对于许多材料，最大力发生在缩颈开始的范围。这意味着对于这些材料 $A_g$ 和 $A_{wn}$ 基

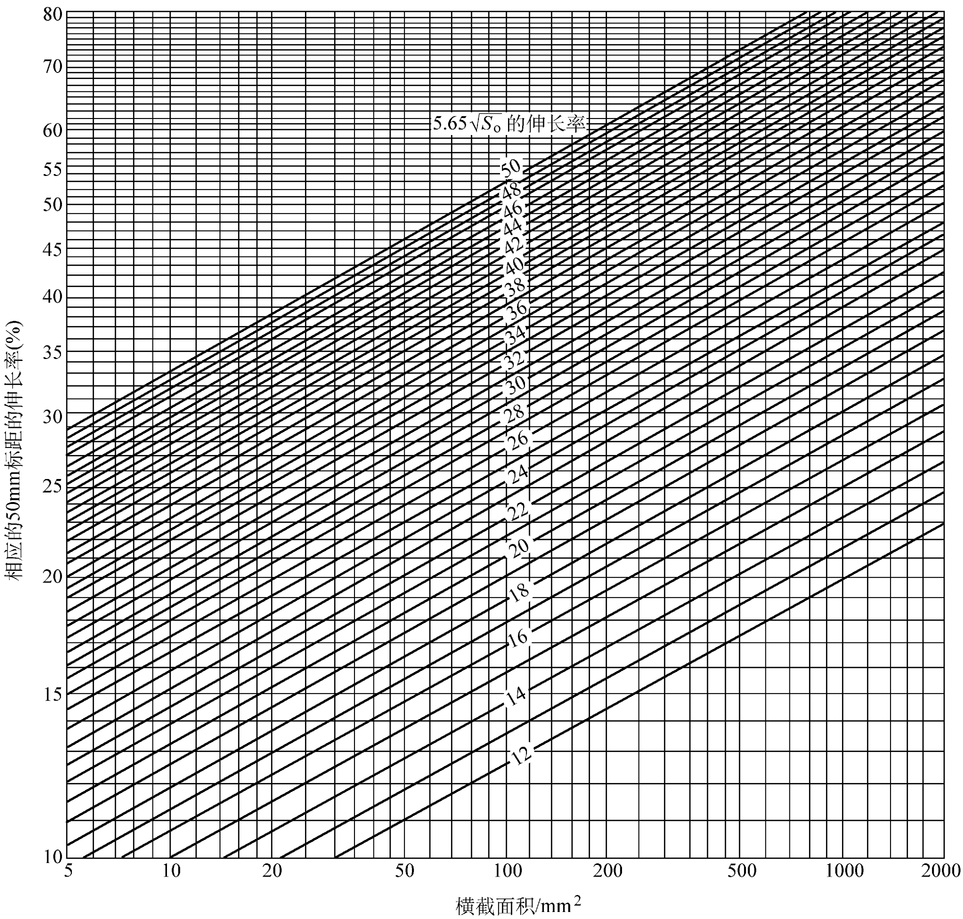



图 2-23　碳素钢和低合金钢 $5.65\sqrt{S_o}$ 与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

本相等。但是，对于有很大冷变形的材料诸如双面减薄的锡板、辐照过的结构钢或在高温下的试验，$A_g$ 和 $A_{wn}$之间有很大不同。

（5）伸长率的换算　包括图像法和公式法。

1）图像法，可以在一固定标距上测定断后伸长率，然后将其换算成比例标距的断后伸长率。对于碳素钢和低合金钢，$5.65\sqrt{S_o}$与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-23 所示，$5.65\sqrt{S_o}$与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-24 所示，$4\sqrt{S_o}$与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-25 所示，$4\sqrt{S_o}$与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-26 所示。对于奥氏体钢，$5.65\sqrt{S_o}$与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-27 所示，$5.65\sqrt{S_o}$与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-28 所示，$4\sqrt{S_o}$与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-29 所示，$4\sqrt{S_o}$与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系如图 2-30 所示。

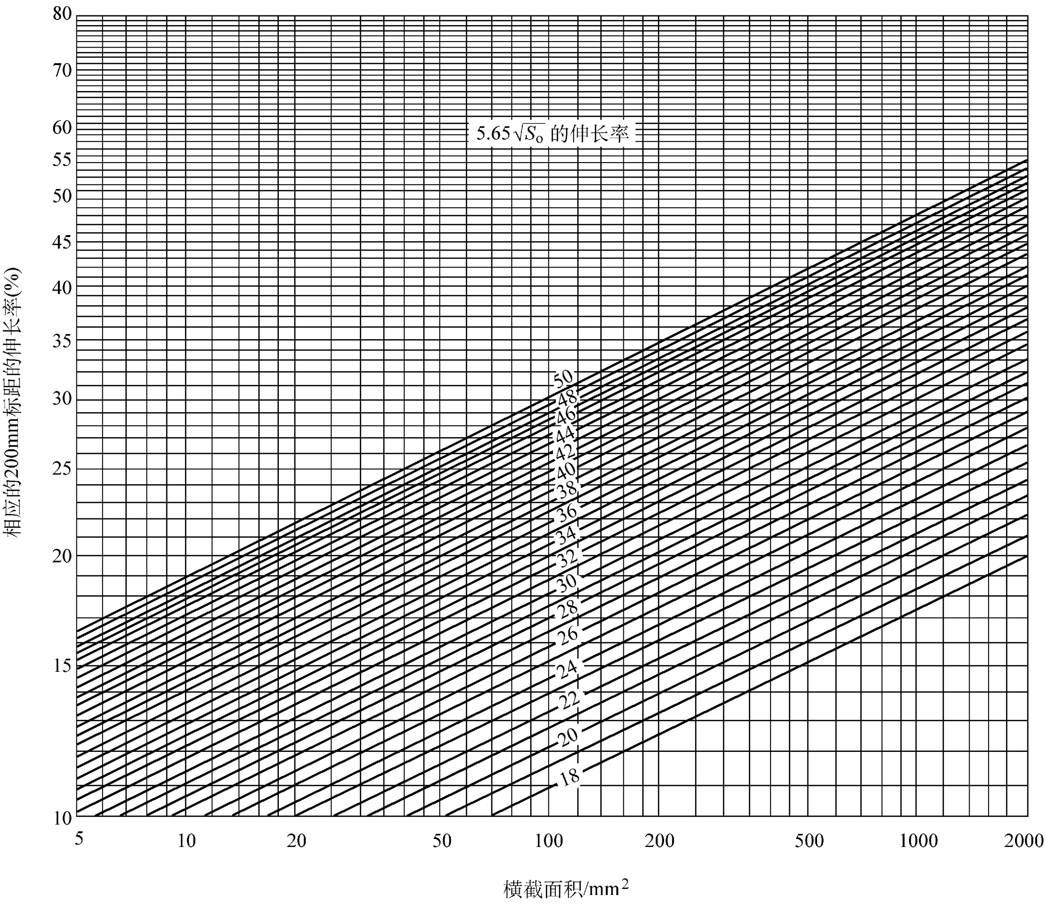



图 2-24　碳素钢和低合金钢 $5.65\sqrt{S_o}$与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

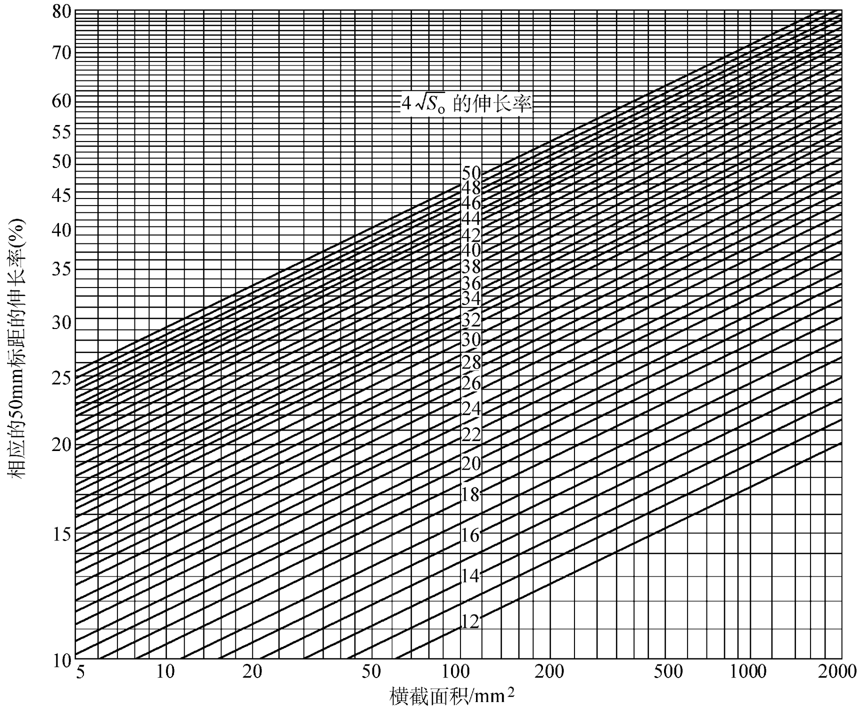



图 2-25　碳素钢和低合金钢 $4\sqrt{S_o}$ 与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

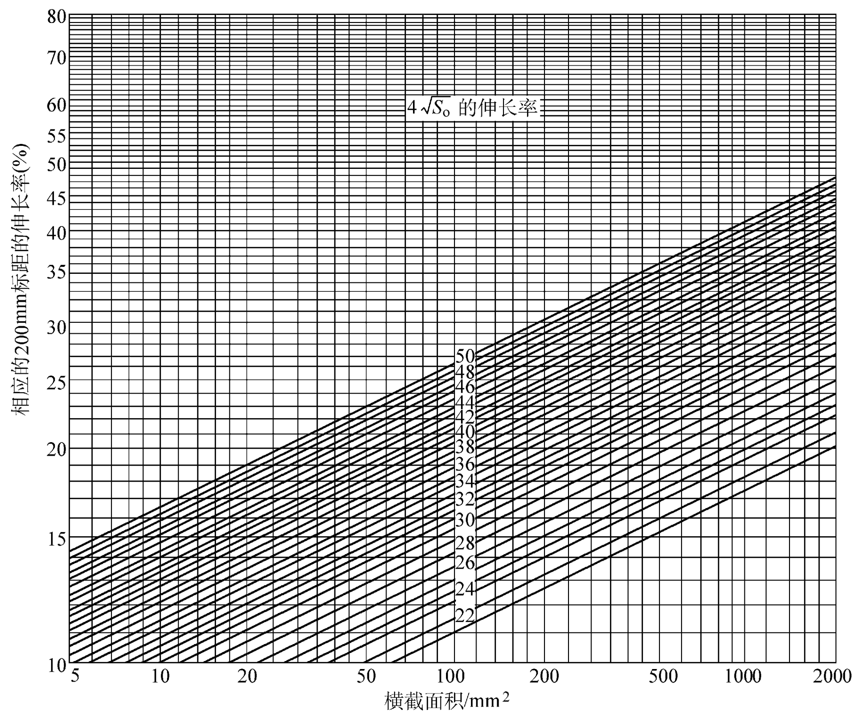



图 2-26　碳素钢和低合金钢 $4\sqrt{S_o}$ 与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

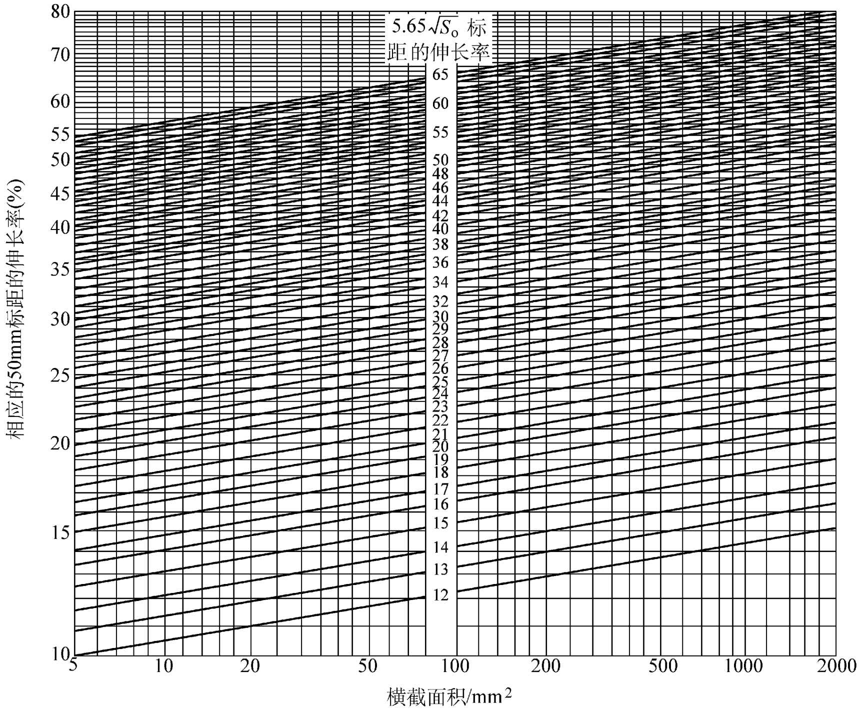



图 2-27　奥氏体钢 5. 65$\sqrt{S_o}$与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

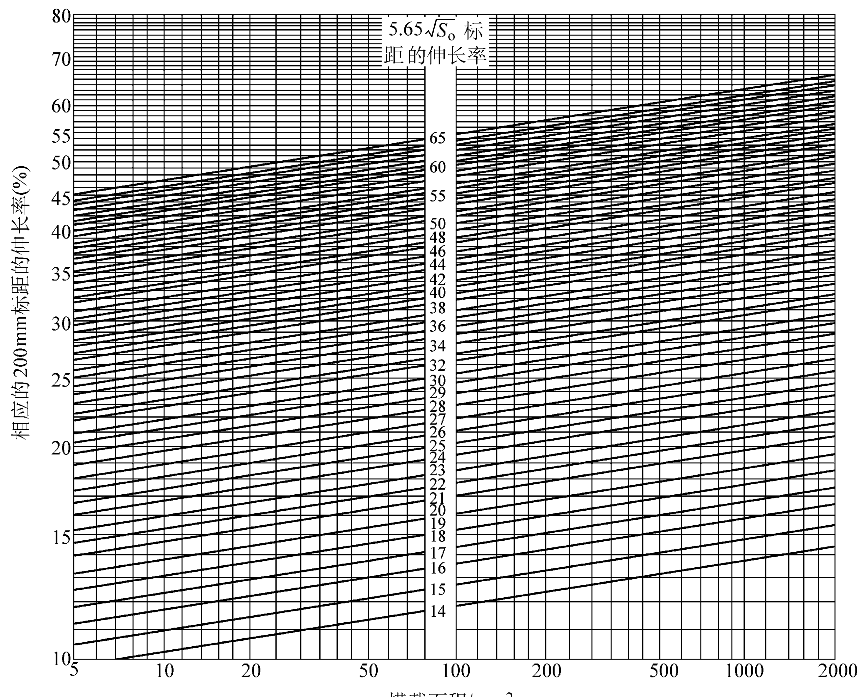



图 2-28　奥氏体钢 5. 65$\sqrt{S_o}$与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

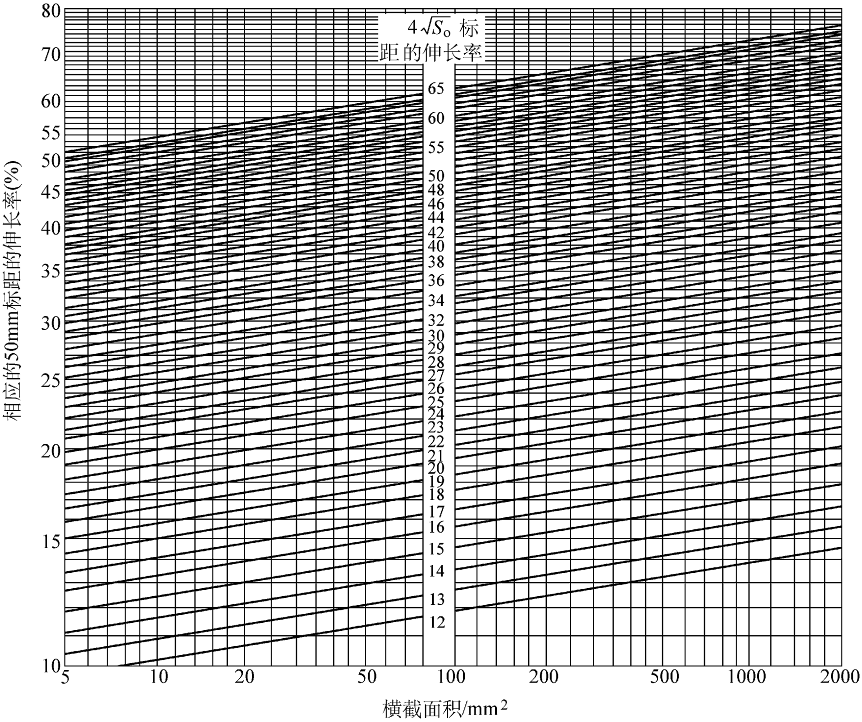



图 2-29　奥氏体钢 $4\sqrt{S_o}$ 与 50mm 定标距的断后伸长率的换算关系

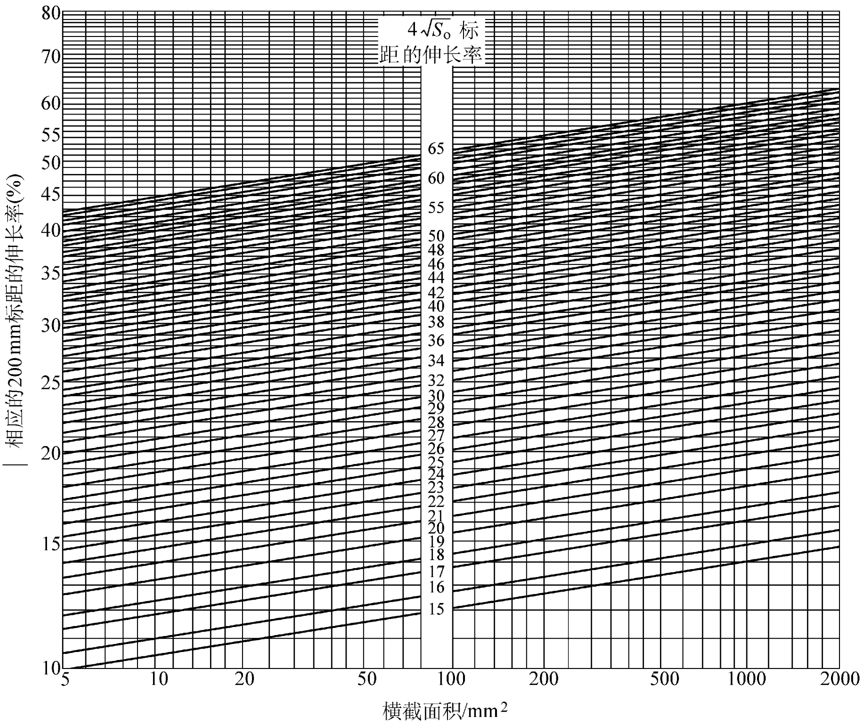



图 2-30　奥氏体钢 $4\sqrt{S_o}$ 与 200mm 定标距的断后伸长率的换算关系

2）公式法，按以下三种情况进行：

① 由已知比例标距的伸长率换算到另一个比例标距的伸长率，按下式计算：

$$A_r = \lambda A$$

式中 $A_r$——另一个比例标距的伸长率（%）；

$A$——已知比例标距的伸长率（%）。

$\lambda$——换算因子（碳素钢与低合金钢见表2-16，奥氏体钢见表2-17）。

**表2-16 不同比例标距之间伸长率的换算因子 $\lambda$**（碳素钢与低合金钢）

| 实测伸长率试样的原始标距 $L_o$ | 换算到下列比例标距的换算因子 $\lambda$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $4\sqrt{S_o}$ | $5.65\sqrt{S_o}$ | $8.16\sqrt{S_o}$ | $11.3\sqrt{S_o}$ | $4d_o$ | $8d_o$ |
| $4\sqrt{S_o}$ | 1.000 | 0.871 | 0.752 | 0.660 | 0.952 | 0.722 |
| $5.65\sqrt{S_o}$ | 1.148 | 1.000 | 0.863 | 0.758 | 1.093 | 0.829 |
| $8.16\sqrt{S_o}$ | 1.330 | 1.158 | 1.000 | 0.878 | 1.267 | 0.960 |
| $11.3\sqrt{S_o}$ | 1.515 | 1.320 | 1.139 | 1.000 | 1.443 | 1.093 |
| $4d_o$ | 1.050 | 0.915 | 0.790 | 0.693 | 1.000 | 0.758 |
| $8d_o$ | 1.386 | 1.207 | 1.042 | 0.915 | 1.320 | 1.000 |

注：原始标距 $5d_o = 5.65\sqrt{S_o}$；$10d_o = 11.3\sqrt{S_o}$。

示例：已知碳素钢试样标距 $5.65\sqrt{S_o}$ 的伸长率为25%，换算成标距 $11.3\sqrt{S_o}$ 的伸长率。查表2-16，$\lambda = 0.758$，则 $A_r = 0.758 \times 25\% = 18.95\%$，修约到19%。

**表2-17 不同比例标距之间伸长率的换算因子 $\lambda$**（奥氏体钢）

| 实测伸长率试样的原始标距 $L_o$ | 换算到下列比例标距的换算因子 $\lambda$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $4\sqrt{S_o}$ | $5.65\sqrt{S_o}$ | $8.16\sqrt{S_o}$ | $11.3\sqrt{S_o}$ | $4d_o$ | $8d_o$ |
| $4\sqrt{S_o}$ | 1.000 | 0.957 | 0.913 | 0.876 | 0.985 | 0.902 |
| $5.65\sqrt{S_o}$ | 1.045 | 1.000 | 0.954 | 0.916 | 1.029 | 0.942 |
| $8.16\sqrt{S_o}$ | 1.095 | 1.048 | 1.000 | 0.959 | 1.078 | 0.987 |
| $11.3\sqrt{S_o}$ | 1.141 | 1.092 | 1.042 | 1.000 | 1.124 | 1.029 |
| $4d_o$ | 1.015 | 0.972 | 0.928 | 0.890 | 1.000 | 0.916 |
| $8d_o$ | 1.109 | 1.061 | 1.013 | 0.972 | 1.092 | 1.000 |

注：原始标距 $5d_o = 5.65\sqrt{S_o}$；$10d_o = 11.3\sqrt{S_o}$。

② 横截面积相等的试样，从一个定标距伸长率换算到另一个定标距的伸长率，按下式计算：

$$A_r = \alpha A$$

式中 $A_r$——另一个定标距的伸长率（%）；

$A$——已知定标距的伸长率（%）。

$\alpha$——换算因子，见表2-18、表2-19。

表 2-18　不同定标距之间伸长率的换算因子 $\alpha$（横截面积相同，碳素钢与低合金钢）

| 实测伸长率试样的原始标距 $L_o$/mm | 换算到下列定标距的换算因子 $\alpha$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 50mm | 80mm | 100mm | 200mm |
| 50 | 1.000 | 0.829 | 0.758 | 0.574 |
| 80 | 1.207 | 1.000 | 0.915 | 0.693 |
| 100 | 1.320 | 1.093 | 1.000 | 0.758 |
| 200 | 1.741 | 1.443 | 1.320 | 1.000 |

示例：已知碳素钢定标距为 200mm 试样的实测伸长率为 20%，换算到相同横截面积下，定标距为 100mm 的伸长率值，查表 2-18，得知 $\alpha = 1.320$，则 $A = 1.320 \times 20\% = 26.40\%$，修约到 26%。

表 2-19　不同定标距之间伸长率的换算因子 $\alpha$（横截面积相同，奥氏体钢）

| 实测伸长率试样的原始标距 $L_o$/mm | 换算到下列比列标距的换算因子 $\alpha$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 50mm | 80mm | 100mm | 200mm |
| 50 | 1.000 | 0.942 | 0.916 | 0.839 |
| 80 | 1.062 | 1.000 | 0.972 | 0.890 |
| 100 | 1.092 | 1.029 | 1.000 | 0.916 |
| 200 | 1.193 | 1.123 | 1.092 | 1.000 |

③ 由比例标距伸长率换算定标距的伸长率，按下式计算：

$$A_r = \beta A$$

式中　$A_r$——另一个定标距的伸长率（%）；

$A$——已知定标距的伸长率（%）。

$\beta$——换算因子，见表 2-20、表 2-21。

表 2-20　标距 5.65 $\sqrt{S_o}$ 的伸长率与不同定标距伸长率的换算因子 $\beta$（碳素钢与低合金钢）

| 欲求伸长率试样的横截面积 $S_o$/$mm^2$ | 由标距 5.65 $\sqrt{S_o}$ 换算到下列定标距的换算因子 $\beta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200mm | 100mm | 80mm | 50mm |
| 5 | 0.331 | 0.437 | 0.478 | 0.577 |
| 10 | 0.381 | 0.502 | 0.549 | 0.663 |
| 15 | 0.413 | 0.545 | 0.596 | 0.719 |
| 20 | 0.437 | 0.577 | 0.631 | 0.761 |
| 25 | 0.457 | 0.603 | 0.660 | 0.796 |
| 30 | 0.474 | 0.626 | 0.684 | 0.826 |
| 35 | 0.489 | 0.645 | 0.706 | 0.852 |
| 40 | 0.502 | 0.663 | 0.725 | 0.875 |
| 45 | 0.514 | 0.679 | 0.742 | 0.896 |
| 50 | 0.525 | 0.693 | 0.758 | 0.915 |
| 55 | 0.535 | 0.706 | 0.772 | 0.932 |
| 60 | 0.545 | 0.719 | 0.786 | 0.949 |
| 70 | 0.562 | 0.741 | 0.811 | 0.978 |
| 80 | 0.577 | 0.761 | 0.833 | 1.005 |
| 90 | 0.591 | 0.780 | 0.852 | 1.029 |
| 100 | 0.603 | 0.796 | 0.871 | 1.051 |
| 110 | 0.615 | 0.812 | 0.887 | 1.071 |
| 120 | 0.626 | 0.826 | 0.903 | 1.090 |

（续）

| 欲求伸长率试样的横截面积 $S_o$/mm² | 由标距 5.65 $\sqrt{S_o}$ 换算到下列定标距的换算因子 $\beta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200mm | 100mm | 80mm | 50mm |
| 130 | 0.636 | 0.839 | 0.917 | 1.107 |
| 140 | 0.645 | 0.852 | 0.931 | 1.124 |
| 150 | 0.654 | 0.863 | 0.944 | 1.139 |
| 160 | 0.663 | 0.875 | 0.956 | 1.154 |
| 170 | 0.671 | 0.885 | 0.968 | 1.168 |
| 180 | 0.679 | 0.896 | 0.979 | 1.182 |
| 190 | 0.686 | 0.905 | 0.990 | 1.195 |
| 200 | 0.693 | 0.915 | 1.000 | 1.207 |
| 210 | 0.700 | 0.924 | 1.010 | 1.219 |
| 220 | 0.706 | 0.932 | 1.019 | 1.230 |
| 230 | 0.713 | 0.941 | 1.028 | 1.241 |
| 240 | 0.719 | 0.949 | 1.037 | 1.252 |
| 250 | 0.725 | 0.956 | 1.046 | 1.262 |
| 260 | 0.730 | 0.964 | 1.054 | 1.272 |
| 270 | 0.736 | 0.971 | 1.062 | 1.281 |
| 280 | 0.741 | 0.978 | 1.070 | 1.291 |
| 290 | 0.747 | 0.985 | 1.077 | 1.300 |
| 300 | 0.752 | 0.992 | 1.084 | 1.309 |
| 310 | 0.757 | 0.998 | 1.092 | 1.317 |
| 320 | 0.761 | 1.005 | 1.099 | 1.326 |
| 330 | 0.766 | 1.011 | 1.105 | 1.334 |
| 340 | 0.771 | 1.017 | 1.112 | 1.342 |
| 350 | 0.775 | 1.023 | 1.118 | 1.350 |
| 360 | 0.780 | 1.029 | 1.125 | 1.357 |
| 370 | 0.784 | 1.034 | 1.131 | 1.365 |
| 380 | 0.788 | 1.040 | 1.137 | 1.372 |
| 390 | 0.792 | 1.045 | 1.143 | 1.379 |
| 400 | 0.796 | 1.051 | 1.149 | 1.386 |
| 410 | 0.800 | 1.056 | 1.154 | 1.393 |
| 420 | 0.804 | 1.061 | 1.160 | 1.400 |
| 430 | 0.808 | 1.066 | 1.165 | 1.406 |
| 440 | 0.812 | 1.071 | 1.171 | 1.413 |
| 450 | 0.815 | 1.076 | 1.176 | 1.419 |
| 460 | 0.819 | 1.080 | 1.181 | 1.426 |
| 470 | 0.822 | 1.085 | 1.186 | 1.432 |
| 480 | 0.826 | 1.090 | 1.191 | 1.438 |
| 490 | 0.829 | 1.094 | 1.196 | 1.444 |
| 500 | 0.833 | 1.099 | 1.201 | 1.450 |
| 550 | 0.849 | 1.120 | 1.224 | 1.477 |
| 600 | 0.863 | 1.139 | 1.246 | 1.503 |
| 650 | 0.877 | 1.158 | 1.266 | 1.528 |
| 700 | 0.891 | 1.175 | 1.285 | 1.550 |
| 750 | 0.903 | 1.191 | 1.303 | 1.572 |
| 800 | 0.915 | 1.207 | 1.320 | 1.592 |

（续）

| 欲求伸长率试样的横截面积 $S_o/mm^2$ | 由标距 $5.65\sqrt{S_o}$ 换算到下列定标距的换算因子 $\beta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200mm | 100mm | 80mm | 50mm |
| 850 | 0.926 | 1.222 | 1.336 | 1.612 |
| 900 | 0.936 | 1.236 | 1.351 | 1.630 |
| 950 | 0.947 | 1.249 | 1.366 | 1.648 |
| 1000 | 0.956 | 1.262 | 1.380 | 1.665 |
| 1050 | 0.966 | 1.274 | 1.393 | 1.681 |
| 1100 | 0.975 | 1.286 | 1.406 | 1.697 |
| 1150 | 0.983 | 1.298 | 1.419 | 1.712 |
| 1200 | 0.992 | 1.309 | 1.431 | 1.727 |
| 1250 | 1.000 | 1.320 | 1.443 | 1.741 |
| 1300 | 1.008 | 1.330 | 1.454 | 1.755 |
| 1350 | 1.016 | 1.340 | 1.465 | 1.768 |
| 1400 | 1.023 | 1.350 | 1.476 | 1.781 |
| 1450 | 1.030 | 1.359 | 1.486 | 1.794 |
| 1500 | 1.037 | 1.369 | 1.496 | 1.806 |
| 1550 | 1.044 | 1.378 | 1.506 | 1.818 |
| 1600 | 1.051 | 1.386 | 1.516 | 1.829 |
| 1650 | 1.057 | 1.395 | 1.525 | 1.841 |
| 1700 | 1.063 | 1.403 | 1.534 | 1.852 |
| 1750 | 1.070 | 1.411 | 1.543 | 1.862 |
| 1800 | 1.076 | 1.419 | 1.552 | 1.873 |
| 1850 | 1.082 | 1.427 | 1.560 | 1.883 |
| 1900 | 1.087 | 1.435 | 1.569 | 1.893 |
| 1950 | 1.093 | 1.442 | 1.577 | 1.903 |
| 2000 | 1.099 | 1.450 | 1.585 | 1.913 |
| 2050 | 1.104 | 1.457 | 1.593 | 1.922 |
| 2100 | 1.109 | 1.464 | 1.600 | 1.931 |
| 2150 | 1.115 | 1.471 | 1.608 | 1.941 |
| 2200 | 1.120 | 1.477 | 1.615 | 1.950 |
| 2250 | 1.125 | 1.484 | 1.623 | 1.958 |
| 2300 | 1.130 | 1.491 | 1.630 | 1.967 |
| 2350 | 1.135 | 1.497 | 1.637 | 1.975 |
| 2400 | 1.139 | 1.503 | 1.644 | 1.984 |
| 2450 | 1.144 | 1.510 | 1.651 | 1.992 |
| 2500 | 1.149 | 1.516 | 1.657 | 2.000 |
| 2550 | 1.153 | 1.522 | 1.664 | 2.008 |
| 2600 | 1.158 | 1.528 | 1.670 | 2.016 |
| 2650 | 1.162 | 1.533 | 1.677 | 2.023 |
| 2700 | 1.167 | 1.539 | 1.683 | 2.031 |
| 2750 | 1.171 | 1.545 | 1.689 | 2.038 |
| 2800 | 1.175 | 1.550 | 1.695 | 2.046 |
| 2850 | 1.179 | 1.556 | 1.701 | 2.053 |
| 2900 | 1.183 | 1.561 | 1.707 | 2.060 |
| 2950 | 1.187 | 1.567 | 1.713 | 2.067 |
| 3000 | 1.191 | 1.572 | 1.719 | 2.074 |

示例1：已知碳素钢标距5.65 $\sqrt{S_o}$的伸长率为20%，换算成宽为25mm、厚为6mm，标距为50mm试样的伸长率，查表2-20，得知$\beta = 1.139$，则$A = 1.139 \times 20\% = 22.78\%$，修约到23%。

示例2：已知碳素钢40mm×10mm，标距200mm的试样，伸长率为25%，换算成标距为5.65 $\sqrt{S_o}$的伸长率，查表2-20，得知$\beta = 0.796$，则$A = 20\% \times 1/0.796 = 31.41\%$，修约到31%。

**表2-21 标距5.65 $\sqrt{S_o}$的伸长率与不同定标距伸长率的换算因子$\beta$**（奥氏体钢）

| 欲求伸长率的试样横截面积$S_o$/mm$^2$ | 由标距5.65 $\sqrt{S_o}$换算到下列定标距的换算因子$\beta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200mm | 100mm | 80mm | 50mm |
| 5 | 0.706 | 0.771 | 0.794 | 0.842 |
| 10 | 0.738 | 0.806 | 0.829 | 0.880 |
| 15 | 0.757 | 0.827 | 0.851 | 0.903 |
| 20 | 0.771 | 0.842 | 0.867 | 0.920 |
| 25 | 0.782 | 0.854 | 0.879 | 0.933 |
| 30 | 0.792 | 0.864 | 0.889 | 0.944 |
| 35 | 0.779 | 0.873 | 0.898 | 0.953 |
| 40 | 0.806 | 0.880 | 0.906 | 0.961 |
| 45 | 0.812 | 0.887 | 0.912 | 0.969 |
| 50 | 0.818 | 0.893 | 0.919 | 0.975 |
| 55 | 0.823 | 0.898 | 0.924 | 0.981 |
| 60 | 0.827 | 0.903 | 0.929 | 0.986 |
| 70 | 0.835 | 0.912 | 0.938 | 0.996 |
| 80 | 0.842 | 0.920 | 0.946 | 1.005 |
| 90 | 0.849 | 0.927 | 0.953 | 1.012 |
| 100 | 0.854 | 0.933 | 0.960 | 1.019 |
| 110 | 0.860 | 0.939 | 0.966 | 1.025 |
| 120 | 0.864 | 0.944 | 0.971 | 1.031 |
| 130 | 0.869 | 0.949 | 0.976 | 1.036 |
| 140 | 0.873 | 0.953 | 0.981 | 1.041 |
| 150 | 0.877 | 0.957 | 0.985 | 1.045 |
| 160 | 0.880 | 0.961 | 0.989 | 1.050 |
| 170 | 0.884 | 0.965 | 0.993 | 1.054 |
| 180 | 0.887 | 0.969 | 0.996 | 1.058 |
| 190 | 0.890 | 0.972 | 1.000 | 1.061 |
| 200 | 0.893 | 0.975 | 1.003 | 1.065 |
| 210 | 0.896 | 0.978 | 1.006 | 1.068 |
| 220 | 0.898 | 0.981 | 1.009 | 1.071 |
| 230 | 0.901 | 0.984 | 1.012 | 1.074 |
| 240 | 0.903 | 0.986 | 1.015 | 1.077 |
| 250 | 0.906 | 0.989 | 1.017 | 1.080 |
| 260 | 0.908 | 0.991 | 1.020 | 1.083 |
| 270 | 0.910 | 0.994 | 1.022 | 1.085 |
| 280 | 0.912 | 0.996 | 1.025 | 1.088 |
| 290 | 0.914 | 0.998 | 1.027 | 1.090 |
| 300 | 0.916 | 1.000 | 1.029 | 1.093 |

（续）

| 欲求伸长率的试样横截面积 $S_o/mm^2$ | 由标距 $5.65\sqrt{S_o}$ 换算到下列定标距的换算因子 $\beta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200mm | 100mm | 80mm | 50mm |
| 310 | 0.918 | 1.003 | 1.031 | 1.095 |
| 320 | 0.920 | 1.005 | 1.033 | 1.097 |
| 330 | 0.922 | 1.007 | 1.035 | 1.099 |
| 340 | 0.923 | 1.008 | 1.037 | 1.101 |
| 350 | 0.925 | 1.010 | 1.039 | 1.103 |
| 360 | 0.927 | 1.012 | 1.041 | 1.105 |
| 370 | 0.928 | 1.014 | 1.043 | 1.107 |
| 380 | 0.930 | 1.016 | 1.045 | 1.109 |
| 390 | 0.932 | 1.017 | 1.047 | 1.111 |
| 400 | 0.933 | 1.019 | 1.048 | 1.113 |
| 410 | 0.935 | 1.021 | 1.050 | 1.114 |
| 420 | 0.936 | 1.022 | 1.051 | 1.116 |
| 430 | 0.937 | 1.024 | 1.053 | 1.118 |
| 440 | 0.939 | 1.025 | 1.055 | 1.119 |
| 450 | 0.940 | 1.027 | 1.056 | 1.121 |
| 460 | 0.941 | 1.028 | 1.058 | 1.123 |
| 470 | 0.943 | 1.029 | 1.059 | 1.124 |
| 480 | 0.944 | 1.031 | 1.060 | 1.126 |
| 490 | 0.945 | 1.032 | 1.062 | 1.127 |
| 500 | 0.946 | 1.033 | 1.063 | 1.129 |
| 550 | 0.952 | 1.040 | 1.070 | 1.135 |
| 600 | 0.957 | 1.045 | 1.076 | 1.142 |
| 650 | 0.962 | 1.051 | 1.081 | 1.148 |
| 700 | 0.967 | 1.056 | 1.086 | 1.153 |
| 750 | 0.971 | 1.060 | 1.091 | 1.158 |
| 800 | 0.975 | 1.065 | 1.095 | 1.163 |
| 850 | 0.979 | 1.069 | 1.100 | 1.167 |
| 900 | 0.982 | 1.073 | 1.104 | 1.171 |
| 950 | 0.986 | 1.076 | 1.107 | 1.176 |
| 1000 | 0.989 | 1.080 | 1.111 | 1.179 |
| 1050 | 0.992 | 1.083 | 1.114 | 1.183 |
| 1100 | 0.995 | 1.087 | 1.118 | 1.187 |
| 1150 | 0.998 | 1.090 | 1.121 | 1.190 |
| 1200 | 1.000 | 1.093 | 1.124 | 1.193 |
| 1250 | 1.003 | 1.095 | 1.127 | 1.196 |
| 1300 | 1.006 | 1.098 | 1.130 | 1.199 |
| 1350 | 1.008 | 1.101 | 1.132 | 1.202 |
| 1400 | 1.010 | 1.103 | 1.135 | 1.205 |
| 1450 | 1.013 | 1.106 | 1.138 | 1.208 |
| 1500 | 1.015 | 1.108 | 1.140 | 1.210 |
| 1550 | 1.017 | 1.110 | 1.142 | 1.213 |
| 1600 | 1.019 | 1.113 | 1.145 | 1.215 |
| 1650 | 1.021 | 1.115 | 1.147 | 1.217 |
| 1700 | 1.023 | 1.117 | 1.149 | 1.220 |

（续）

| 欲求伸长率的试样横截面积 $S_o$/$mm^2$ | 由标距 $5.65\sqrt{S_o}$ 换算到下列定标距的换算因子 $\beta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 200mm | 100mm | 80mm | 50mm |
| 1750 | 1.025 | 1.119 | 1.151 | 1.222 |
| 1800 | 1.027 | 1.121 | 1.153 | 1.224 |
| 1850 | 1.028 | 1.123 | 1.155 | 1.226 |
| 1900 | 1.030 | 1.125 | 1.157 | 1.228 |
| 1950 | 1.032 | 1.127 | 1.159 | 1.230 |
| 2000 | 1.033 | 1.129 | 1.161 | 1.232 |
| 2050 | 1.035 | 1.130 | 1.163 | 1.234 |
| 2100 | 1.037 | 1.132 | 1.165 | 1.236 |
| 2150 | 1.038 | 1.134 | 1.166 | 1.238 |
| 2200 | 1.040 | 1.135 | 1.168 | 1.240 |
| 2250 | 1.041 | 1.137 | 1.170 | 1.242 |
| 2300 | 1.043 | 1.139 | 1.171 | 1.243 |
| 2350 | 1.044 | 1.140 | 1.173 | 1.245 |
| 2400 | 1.045 | 1.142 | 1.175 | 1.247 |
| 2450 | 1.047 | 1.143 | 1.176 | 1.248 |
| 2500 | 1.048 | 1.145 | 1.178 | 1.250 |
| 2550 | 1.050 | 1.146 | 1.179 | 1.252 |
| 2600 | 1.051 | 1.148 | 1.181 | 1.253 |
| 2650 | 1.052 | 1.149 | 1.182 | 1.255 |
| 2700 | 1.053 | 1.150 | 1.183 | 1.256 |
| 2750 | 1.055 | 1.152 | 1.185 | 1.258 |
| 2800 | 1.056 | 1.153 | 1.186 | 1.259 |
| 2850 | 1.057 | 1.154 | 1.187 | 1.260 |
| 2900 | 1.058 | 1.156 | 1.189 | 1.262 |
| 2950 | 1.059 | 1.157 | 1.190 | 1.263 |
| 3000 | 1.060 | 1.158 | 1.191 | 1.265 |

**17. 断面收缩率的测定**

将试样断裂部分仔细地配接在一起，使其轴线处于同一直线上。断裂后最小横截面积的测定应准确到 ±2%。原始横截面积与断后最小横截面积之差除以原始横截面积的百分率得到断面收缩率，按照下式计算：

$$Z=\frac{S_o-S_u}{S_o}\times 100\%$$

式中　$Z$——断面收缩率（%）；

$S_o$——平行长度部分的原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$S_u$——断后最小横截面积，单位为 $mm^2$。

对于小直径的圆试样或其他横截面形状的试样，断后横截面积的测量准确度达到 ±2% 很困难。

**18. 试验结果数值的修约**

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如果未规定具体要求，应按照如下要求进行修约：

1）强度值修约至 1MPa。

2）屈服点延伸率修约至 0.1%，其他延伸率和断后伸长率修约至 0.5%。

3）断面收缩率修约至 1%。

**19. 测量不确定度**

（1）总则　测量不确定度分析对于辨识测量结果不一致性的主要来源是很有用的。

基于 GB/T 228.1 的得到的产品标准和材料性能的数据库，以及较早版本的标准对测量不确定度都有内在的贡献，根据测量不确定度进行调整是不恰当的，为了顺从失效产品而冒险也是不恰当的。因此，按照以下步骤推导出来的不确定度的估计值也仅仅是个参考值，除非客户特别指明。

（2）试验条件　GB/T 228.1 规定的试验条件和极限不应考虑测量不确定度而进行调整，除非客户特别指明。

（3）试验结果　估计的测量不确定度不应与测量结果组合起来评判是否满足产品标准要求，除非客户特别指明。

（4）拉伸试验测量结果不确定度的评定范例　评定低碳低合金钢以三个试样平均结果的抗拉强度和塑性指标的不确定度。使用 10 个试样，测量得到的结果如表 2-22 所示，试验标准偏差按贝塞尔公式计算：

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n-1}}$$

式中 $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$。

**表 2-22　重复性试验测量结果**

| 序号 | 试样直径 $d$/mm | 抗拉强度 $R_m$/MPa | 下屈服强度 $R_{eL}$/MPa | 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$/MPa | 断后伸长率 $A$(%) | 断面收缩率 $Z$(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10.00 | 767 | 450 | 450 | 22.5 | 50 |
| 2 | 10.00 | 767 | 448 | 449 | 21.0 | 50 |
| 3 | 10.00 | 771 | 452 | 453 | 22.0 | 50 |
| 4 | 10.00 | 769 | 452 | 452 | 22.0 | 50 |
| 5 | 10.01 | 763 | 448 | 450 | 22.5 | 52 |
| 6 | 10.00 | 770 | 444 | 447 | 22.5 | 53 |
| 7 | 9.99 | 767 | 447 | 451 | 21.5 | 50 |
| 8 | 9.99 | 766 | 445 | 445 | 22.0 | 51 |
| 9 | 9.99 | 760 | 444 | 446 | 21.5 | 50 |
| 10 | 10.00 | 770 | 446 | 447 | 22.0 | 48 |
| 平均值 | | 767 | 447.6 | 449 | 21.95 | 50.4 |
| 标准偏差 $s_i$ | | 3.399 | 2.989 | 2.667 | 0.497 | 1.350 |
| 相对标准偏差 | | 0.443% | 0.668% | 0.594% | 2.264% | 2.679% |

## 2.3　金属材料低温拉伸试验

金属材料低温拉伸试验按照 GB/T 13239—2006《金属材料低温拉伸试验方法》

进行。

## 2.3.1　试样

低温拉伸试样尺寸如图 2-31 ~ 图 2-34 所示，其他要求与室温拉伸试样相同。

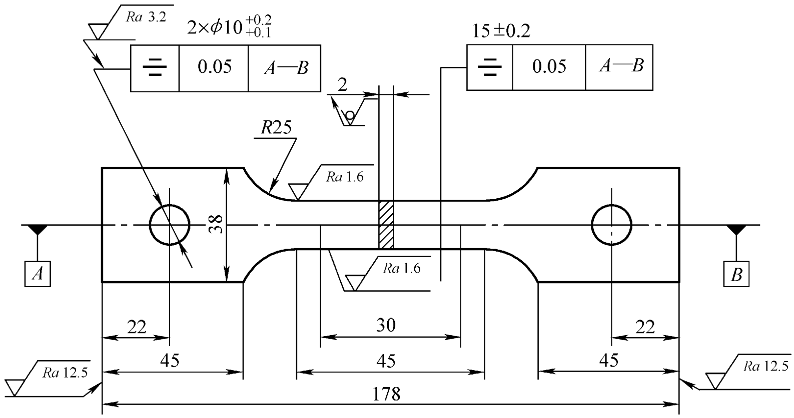



图 2-31　第 1 类低温拉伸试样

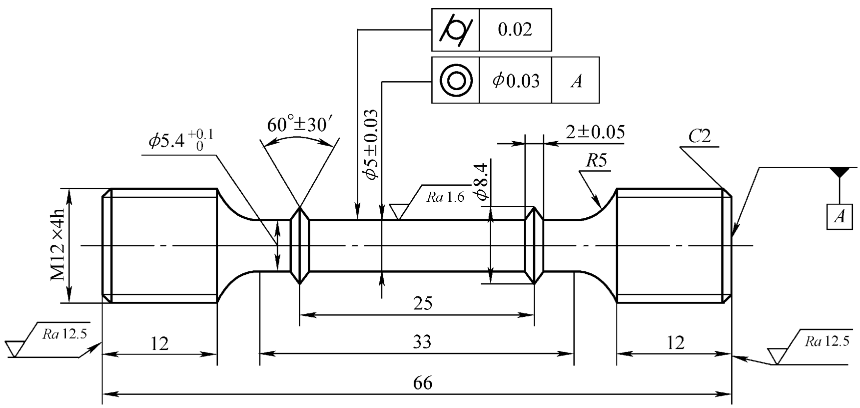



图 2-32　第 2 类低温拉伸试样

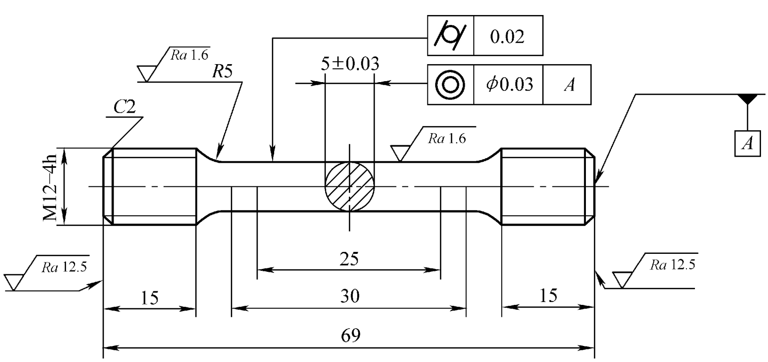



图 2-33　第 3 类低温拉伸试样

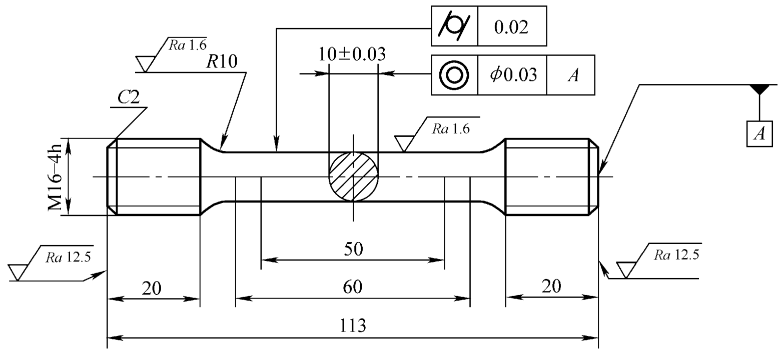



图 2-34　第 4 类低温拉伸试样

## 2. 3. 2　试验设备

**1. 试验机**

试验机应符合 GB/T 16825. 1 的要求，准确度级别应为 1 级或优于 1 级，除非产品标准另作规定。

**2. 引伸计**

引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160 的要求。测定上屈服强度、下屈服强度、规定塑性延伸强度的试验，应使用不低于 1 级准确度的引伸计。测定其他具有较大延伸率的性能，例如抗拉强度及断后伸长率，应使用不低于 2 级准确度的引伸计。

引伸计标距应不小于 10mm，固定在试样平行长度的中间位置并沿着中心轴的方向。应优先采用能同时测定试样两侧面延伸的双面引伸计，测定屈服强度和规定强度性能时推荐 $L_e > L_o/2$，测定最大力或最大力之后的性能时推荐 $L_e = L_o$ 或近似等于 $L_o$。

为了使室温的波动对引伸计读数的影响降到最低，应防止引伸计超出冷却装置的任何部分受到空气气流的影响，尽可能保持室温温度的稳定性和试验机周围空气气流的平稳。

**3. 冷却装置**

（1）一般要求　冷却装置应能将试样冷却到规定温度，并具有保温能力，应保证试验温度的稳定性和均匀性。

冷却方法一般有如下几种：

1）借助冷却装置（低温恒温器）。

2）借助压缩气体膨胀（如 $CO_2$ 或 $N_2$）冷却。

3）借助达到沸点时刻的液体（如液 $N_2$）或冷冻液（如酒精）的浸泡冷却。根据试验温度可选用表 2-23 中的冷却介质。当操作冷却介质的时候，测试人员应事先采取符合相关规定的安全防范措施，避免造成人员伤害，以及对测试仪器、试样的损坏。

表 2-23　液体冷却介质及其温度范围

| 冷 却 介 质 | 温度/℃(K) | 冷 却 介 质 | 温度/℃(K) |
|---|---|---|---|
| 80%冰+20%氯化铵 | -15.4(257.8) | 干冰+工业酒精 | >-75(198) |
| 75.2%冰+24.8%食盐 | -21.3(251.9) | 干冰+无水乙醇 | >-78(195) |
| 62.7%冰+19.7%食盐+17.6%氯化铵 | -25.0(248.0) | 液氮+无水乙醇 | >-105(168) |
| 41.2%冰+58.8%氯化钙 | -54.9(218.3) | 液氮 | -196(77) |

注：表中百分数为质量分数。

（2）温度测量装置　冷却介质或试样的温度用热电偶或其他适当的装置测量，选用适当类型和等级的热电偶对温度测量的准确性起重要作用。

温度测量装置的分辨力应该达到1℃或更好，其误差为在-40~10℃范围应不超过±2℃，在-196~40℃范围应不超过±3℃。

（3）允许的温度偏差　规定温度和指示温度之间允许的温度偏差不超过±3℃。试样标距两端温度差的绝对值应不超过3℃。

温度偏差的判定依据是：在试验过程中，力至少达到测定规定塑性伸长相应的试验力时所测定的温度变化。

（4）温度测量系统的检验　温度测量系统包括：传感器和指示装置。在工作温度范围的检验周期不宜超过90d。如果检验记录显示系统性能的稳定性对测量的准确性影响很小，那么可以延长检验周期但不能超过一年，在检验报告中要记录温度测量系统的误差。

用于检验温度测量系统的仪器应能溯源到国家基准。

## 2.3.3　试验内容及结果表示

**1. 试样的冷却**

试样冷却到规定温度，冷却时间的长短取决于试样的形状、尺寸、表面状况、材料本身的特性、夹具的质量及冷却介质的形式等。因此，通过预冷却试验决定冷却的时间。

冷却介质为液体时，对厚度或直径不大于5mm的试样，保温时间不少于5min；对厚度或直径大于5mm的试样，保温时间不少于10min。

冷却介质为气体时，对厚度或直径不大于5mm的试样，保温时间不少于10min；对厚度或直径大于5mm的试样，保温时间不少于15min。

在冷却过程中，除非有特殊的约定，温度不能超过规定温度的允许偏差范围。

当试样达到规定温度时引伸计调零。

只有当引伸装置达到稳定状态后，加力才能开始。

**2. 温度的测量**

在试样平行长度部分的表面测量其温度时，热电偶测量端应与试样的表面有良好的接触。当标距小于50mm，热电偶分别固定在平行长度部分的两端；当标距大于或等于50mm，应在平行长度的两端及中间各固定一支热电偶。

如果试样浸泡在均匀的液体介质中，可以直接在液体中测定温度。

试验在液氮中进行则不需要测量温度，但要在试验报告中记录。

**3. 试验力**

试验力的施加使试样应变增加，应采用连续（非阶梯式）的加载方式，没有冲击和颤动。应尽量使试样受轴向拉力的作用，将试样标距内可能受到的挠度和扭矩的影响降到最小。

**4. 试验速率**

除非产品标准另有规定，试样平行长度内的应变速率即为试验速率。

（1）测定上屈服强度时的试验速率　在弹性范围内直至上屈服强度，应变速率应在 0.00003 ~ 0.0003/s 之间，并尽可能保持恒定。如果试验机不能测定或控制应变速率，可以通过控制试验机夹头的分离速率间接控制应力速率在 6 ~ 60MPa/s 的范围。

（2）测定下屈服强度时的试验速率　若仅测定下屈服强度，弹性范围内试验速率应符合测定上屈服强度时的试验速率的要求。在试样平行长度内的屈服阶段应变速率应在 0.00003 ~ 0.0025/s 之间，并尽可能保持恒定。如果不能直接调节这一应变速率，应通过调节屈服即将开始前的应力速率来调整，在屈服完成之前不再调节试验机的控制。

（3）同时测定上屈服强度和下屈服强度时的试验速率　同时测定上屈服强度和下屈服强度时的试验速率，应满足测定下屈服强度时的试验速率的要求。

（4）测定规定塑性延伸强度时的试验速率　包括以下内容：

1）在弹性范围内的试验速率应符合测定上屈服强度时的试验速率的要求。

2）在塑性范围内直至达到规定塑性延伸强度为止，应变速率应在 0.00003 ~ 0.0025/s 之间。

（5）测定抗拉强度时的试验速率　在塑性范围内应变速率应不超过 0.008/s。如果试验不包括屈服强度或规定塑性延伸强度的测定，试验速率可以达到塑性范围内允许的应变速率的最大值。

**5. 原始横截面积的测定**

通过准确测量尺寸计算原始横截面积，并至少保留 4 位有效数字，测量尺寸的偏差不超过 ±0.5% 或 ±0.01mm，取其中大的值。测量时建议按照表 2-24 选用量具或测量装置。

**表 2-24　量具或测量装置的分辨力**　（单位：mm）

| 试样横截面尺寸 | 分辨力　≤ | 试样横截面尺寸 | 分辨力　≤ |
|---|---|---|---|
| 0.1 ~ 0.5 | 0.001 | >2.0 ~ 10.0 | 0.01 |
| >0.5 ~ 2.0 | 0.005 | >10.0 | 0.05 |

**6. 原始标距的标记**

应尽量采用小标记、细画线或细墨线标记原始标距，但不得用可能引起过早试样断裂的缺口作标记。

无缺口敏感性的材料允许用小刻痕作标记。

对于比例试样，应将原始标距的计算值修约至最接近 5mm 的倍数，中间值向最大一方修约。原始标距的标记应准确到 ±1%。

如果平行长度比原始标距长许多，例如不经机加工的试样，可以标记一系列套叠的

原始标距。

有时，可以在试样表面画一条平行于试样纵轴的线，并在线上标记原始标距。

**7. 低温拉伸性能的测定**

断后伸长率 $A$、规定塑性延伸强度 $R_p$、抗拉强度 $R_m$、上屈服强度 $R_{eH}$、下屈服强度 $R_{eL}$、断面收缩率 $Z$ 的测定方法均与室温拉伸试验时相同。

**8. 试验结果数值的修约**

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如果未规定具体要求，应按照表 2-25 的要求进行修约。修约的方法按照 GB/ T 8170。

**表 2-25　试验结果数值的修约间隔**

| 性　能 | 范　围 | 修约间隔 |
|---|---|---|
| $R_{eH}$、$R_{eL}$、$R_p$、$R_m$ | ≤200MPa | 1MPa |
| | >200 ~ 1000MPa | 5MPa |
| | >1000MPa | 10MPa |
| $A$、$A_t$ | — | 0.5% |
| $Z$ | — | 0.5% |

## 2.4　金属材料液氦拉伸试验

金属材料液氦拉伸试验按照 GB/T 24584—2009《金属材料　拉伸试验　液氦试验方法》进行。

材料在进行位移控制的液氦拉伸试验时，力-时间和力-伸长曲线上可产生锯齿，锯齿是由不稳定的塑性变形和阻力反复冲击造成的。不稳定的塑性变形（不连续屈服）是一个不同步的过程，在高于一般的应变速率条件下，伴随试样内部发热，产生在试样平行长度的局部区域内。

奥氏体不锈钢与各种不连续屈服的锯齿形的应力-应变曲线的实例如图 2-35 所示。

试样温度不能在液氦试验的整个时间里保持恒定。绝热增温时，在每个不连续屈服锯齿内，试样平行长度局部区域内的温度暂时会高于 4K。锯齿的数量和力值下降程度是材料成分和其他参数（例如试样尺寸和试验速度）的函数。一般来说，改变力学试验变量可改变锯齿的类型，但不能消除不连续屈服。室温下材料变形接近等温，一般不发生不连续屈服。因此，材料在液氦的拉伸性能（特别是抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率），缺少室温性能测量的含义。

材料液氦试验的应力-应变特性曲线取决于位移控制，是按传统方法进行材料表征的。

### 2.4.1　试样

**1. 一般要求**

（1）标准圆柱试样　标准圆柱试样的形状和尺寸如图 2-36 和表 2-26 所示，试样头部仅为示意性，可根据试验夹具自行设计。

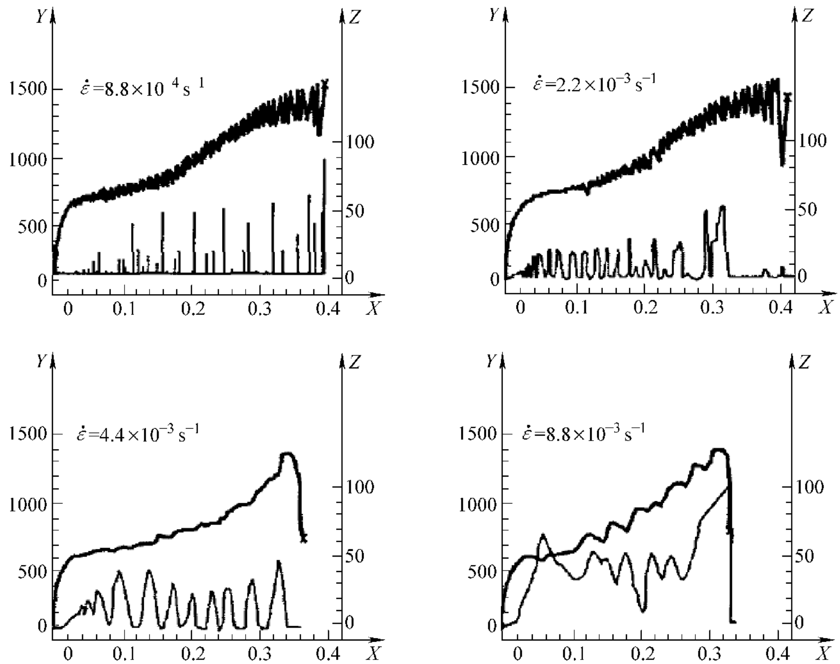



图 2-35　应力-应变曲线图及温度记录

*X*—应变　*Y*—应力　*Z*—温度（K）

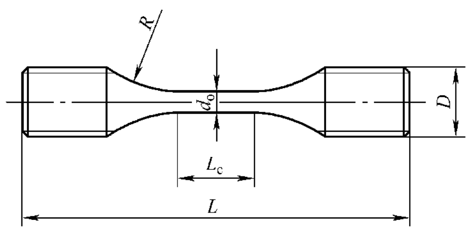



图 2-36　标准圆柱试样的形状

*L*—试样总长度（mm）　$L_c$—试样平行长度（mm）

*D*—端头直径（mm）　$d_o$—试样平行长度的直径（mm）　*R*—过渡圆弧（mm）

**表 2-26　标准圆柱试样的尺寸**　（单位：mm）

| $d_o$ | $D$ | $R$ | $L_c$ | $L$ |
|---|---|---|---|---|
| 7 | M14×2 | 20 | 65 | 105 |
| 6.25 | M12×1.75 | 10 | 40 | 84 |
| 5 | M10×1.5 | 5 | 30 | 56 |
| 3 | M6×1 | 3 | 18 | 38 |

（2）矩形横截面试样　矩形横截面的形状和尺寸如图 2-37 和表 2-27 所示，试样头部仅为示意性，可根据试验夹具自行设计。

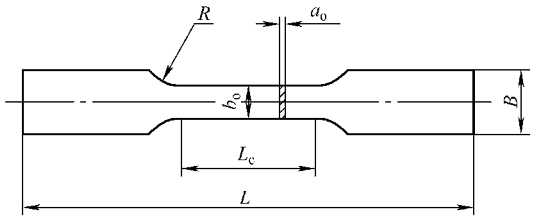



图 2-37　矩形横截面试样的形状

$L$—试样总长度（mm）　$L_c$—试样平行长度（mm）　$B$—端头宽度（mm）　$a_o$—试样平行长度的厚度（mm）　$b_o$—试样平行长度的宽度（mm）　$R$—过渡圆弧（mm）

**表 2-27　矩形横截面试样的尺寸**　（单位：mm）

| $b_o$ | $B$ | $R$ | $L_c$ | $L$ |
|---|---|---|---|---|
| 6 ±0.1 | 23 | 12 | 28 | 96 |
| 3 ±0.05 | 12 | 6 | 17 | 48 |

**2. 其他要求**

当试样直径较小时，试样在加工及试验过程中都需要特别的小心。因为随着试样尺寸的减小，诸如加工、表面处理及同轴度等因素就会变得非常重要。

**3. 取样**

为了确保试样的选取对于产品来说具有代表性，拉伸试验的取样应在材料的最终条件下进行。

在原材料上认为最具代表性的位置进行试样的切割。取样位置大致如下：

1）对于厚度或直径小于 40mm 的产品，取样位置应在中心区域。

2）对于厚度或直径不小于 40mm 的产品，取样位置应在距表面与中心距离相等的位置。

## 2.4.2　试验设备

**1. 试验机**

（1）一般要求　试验机的准确度级别应符合 GB/T 16825.1 的要求，并应为 1 级或优于 1 级，除非产品标准另作规定。

（2）试验机的柔度　试验设备（试验机和低温装置）的柔度（在试验力的作用下设备本身的位移百分比）应该是已知的。为了测量试验机的柔度，应将一刚性试样或专用标定试样连接在加力系统中，并施加一个较低的试验力和一个试验机所允许的最大试验力分别测量柔度。

不同的柔度可能对试样的延伸率和抗拉强度产生影响，因为在柔度较小的试验机上试样会发生较大的不连续变形。

（3）系统设计　材料在液氦中的强度通常是室温的两倍或更高。低温状态下对于相同几何尺寸的试样，恒温器、加力系统零部件及夹具都将承受更大的力。由于很多试验机的容量都不超过 100kN，设备在设计中应考虑使用的小型试样。

（4）选用材料　许多材料，包括绝大多数的铁素体钢在 4K 的温度下会变脆。为避

免设备损坏，制造夹具及其他加载链零部件的材料应选用强度高、韧性好的低温合金。具有低导热性的材料可以有效地阻止热传导。奥氏体不锈钢（022Cr19Ni10N）、马氏体钢（如 12Cr13 等有防锈镀镍层）、锻造镍基超耐热合金及钛合金（TC4 或 TA7）已经用于夹具、拉杆及恒温器框架的制作。非金属材料（如环氧树脂复合物）是优良的绝热体，可用于制作抗压件。

（5）对中　在拉伸试验中准确的系统对中是使弯曲应变最小化的基本手段。设备和夹具应该被调整至载荷能够精确作用于标定试样上，使得最大的弯曲应变不超过轴向应变的 10%。为使弯曲应变降低到可接受的水平，应调整拥有调节功能的恒温器上的平衡调节器，或使用间距垫片来补偿不可调的恒温器。对于一台合格的设备来说，应变的计算是依据标定试样在较低和最大载荷下的读数来确定的。

可在室温和 4K 的温度下使用轴对称测量法检查试验设备是否合格。为完成设备的轴对称性试验，试样的成分及恒温器的选用应与实际低温试验相同，并且试样的分散性要尽可能的小。在加载过程中，试样在平行长度内不能发生塑性应变。在一些情况下有必要使用相对硬的、高强度的标定试样。

对于圆柱形的试样，计算最大弯曲应变应采用三个电阻应变计、引伸计或夹规分别安装在试样平行长度上的中间以及等间距的圆周上。

对于横截面为方形或矩形的试样，应在两平行面（对称的）的中心位置测量应变；对于薄板形试样，应在两个宽面的中心位置测量应变。

对于螺纹或用销钉连接的夹具，可以依照以下步骤来评估试样偏斜的影响。在保证夹具以及拉杆不动的情况下，将试样旋转 180°，重复轴对称测量，然后计算最大弯曲应变和试样的轴向应变。如果用其他的夹具或连接方法来评估试样偏斜的影响，应在报告中注明。

拉伸试验中当在试样的唯一位置测量较小应变时，加载的不同轴性（可能由于试样机加工而引起）是引起测量误差的主要因素。因此，需要在试样的平行长度上取等间距的三个点（或者如果设备的对中非常好，至少应取对称的两点）分别测量应变。最后报出在试样平行长度内中心对称的三个点或两个点的应变平均值。

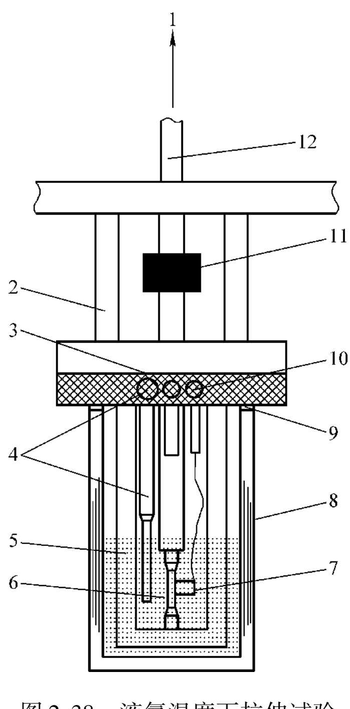



图 2-38　液氮温度下拉伸试验用典型的低温恒温器

1—力　2—室温机架　3—排气孔　4—真空绝热输液管　5—低温机架　6—试样　7—引伸计　8—真空瓶　9—真空瓶密封圈　10—电反馈通道　11—力传感器　12—拉杆

（6）夹具　根据试样类型应选择不同的夹具。为避免设备损坏，应选用由耐低温材料制造的低温专用夹具。

**2. 低温恒温器及其辅助设备**

（1）低温恒温器　低温恒温器（见图 2-38）应

能够保存液氦。对于现有的试验机来说，低温恒温器的机架是特制的，通过商业渠道可以买到真空瓶。低温恒温器有可能附带可调节载荷方向的旋钮，以便对中调整。

（2）真空瓶　不锈钢的真空瓶（抗冲击性能更好）比玻璃的真空瓶更安全。一般对于短时的拉伸试验来说，单层的液氦真空瓶就足够了。当然也可采用双层的真空瓶，外层充满液氮，内层则注入液氦。

（3）辅助设备　真空瓶和液氦输液管需要真空绝热。因此，需要真空泵、高压空气及液氮瓶等辅助设备。

**3. 液面指示器**

为了确保预定的试验条件就需要维持环境中的液氦在一定水平。在常规试验中，由于试样是完全浸泡在液氦中的，因此没有必要使用热电偶来测量其表面温度。可通过指示器或仪表以确保在整个试验中试样完全浸泡在液氦中。在低温恒温器中，位于某些参考点的碳电阻指示开关将被用于确保液面总是保持于试样以上。另外，也可选择在低温恒温器内的垂直位置安装适当长度的超导线传感器，用以连续监视液面高度。

**4. 引伸计**

（1）类型　只要能在液氦温度下正常工作，各种类型的引伸计均可使用。

引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160 的要求。测定规定塑性延伸强度、不连续屈服强度应使用不低于 1 级准确度的引伸计；测定其他具有较大延伸率的性能，应使用不低于 2 级准确度的引伸计。

为了测量规定强度，建议使用平均引伸计。最好能在试样的平行长度部分直接安装或加工引伸计专用的刀口。

用电容引伸计测量时，应使用可进行灵敏度调节的线性部分。

为了避免由于应变片发热而使应变片周围产生气泡，从而影响应变信号，应适当调节应变系统中的桥路电压，使其不影响应变信号的测量。

在试验过程中，只要应变片周围的温度保持恒定，而且电压又不是高到足以引起液氦过于沸腾，应变片的自热就不会成为问题。

当测量 4K 温度的应变量时，可将应变片直接粘结于试样表面。在低温下使用应变片时，应注意应变片、基材材料及粘结剂的选择和结合性。然而，也应该考虑到在应变还未到达 0.2% 塑性延伸强度时应变片粘结松脱的情况。

（2）标定　引伸计需要在室温及 4K 温度下进行标定。对于在 4K 温度下的标定，可以使用长度测量装置，如配有垂直伸缩管的千分尺，将其低温端与引伸计安装好后浸泡于液氦中。如果标定结果是已知的而且被证明是精确的、线性的和可重复的，那么在每次试验之前的室温检查可以认为是对在 4K 温度标定的间接验证。应定期地对引伸计进行在 4K 温度下的直接标定，在设备可能损坏或设备进行修理之后，直接标定更为重要。

### 2.4.3　试验内容及结果表示

**1. 试样的安装**

试样安装于低温恒温器中。注意应使仪器的信号线充分地松弛，这样在定位真空瓶

或在试验时就不会使信号线发生拉伸或折皱的现象。

在对中过程中，应始终保持拉伸力低于材料弹性极限的 1/3。随后维持在一个适当的力，确保在冷却过程中试样仍然保持对中。

在降温过程中，为了维持对中而又避免试样发生不受控制的应变，应采用自由加载条件。

**2. 冷却过程**

试样、引伸计和加力系统等不同部位形成的冰块可以堵塞液氦输液管或引起试验力异常。为避免结冰，在冷却之前应去除设备中的所有可能产生冷凝物的液体，可以使用空气喷射器或热吹风机彻底干燥仪器。如果引伸计配有保护外壳，安装好引伸计以便液氦能自由地在引伸计的活动范围流动，从而避免气泡的附着和与其相关的噪声。

安装真空瓶并向低温恒温器中注入液氮对设备进行预降温。在沸腾平息（达到热平衡）之后排空低温恒温器中的所有液氮，然后向低温恒温器中输入液氦直到试样和夹具完全浸入液氦中。当系统在 4K 的温度下达到热平衡之后就可以开始试验了。在试验过程中，试样应一直浸泡在液氦中。

气态氦比液态氦的热传导性能要低，因此，试样应完全浸泡在液氦中，从而使温升对力学性能测量的影响最小。

**3. 试验速率**

（1）速率控制　液氦温度下拉伸性能的测量会受到试验速率的影响，因此试验中还应测量和控制位移速率。鉴于不连续屈服现象的影响，实际的试验速率是不可能精确控制及保持的，因此需要规定一个公称应变速率。公称应变速率是根据平行长度的位移速率计算出来的。

（2）速率限制　可使用任意的位移速率使应力达到屈服强度的一半。之后，应控制位移速率使公称应变速率不超过 $10^{-3}/s$。更高的应变速率可能造成过高的试样发热，这会影响材料力学性能的测量准确性。

（3）速率范围　一般 4K 温度下的拉伸试验推荐的应变速率范围是 $10^{-5} \sim 10^{-3}/s$，但是一些材料在这个范围内显示出一定的对应变速率改变的敏感性，一些奥氏体高强钢在 $10^{-4} \sim 10^{-3}/s$ 应变速率范围内的拉伸性能显示出轻微的改变，而其他一些强度与热导率较高的材料（如钛合金）也可能显示出类似的倾向。因此，在一些试验中可以考虑使用非常低的应变速率，$10^{-3}/s$ 仅作为本试验所允许的最大应变速率。

对应变速率的适当改变也是允许的。例如，如果测量不连续屈服起始点的应变，就需要适当降低应变速率。如果在应力-应变曲线上的第一个锯齿的起始点与 0.2% 的塑性变形相距很近，为了避免与测量屈服强度发生冲突，就需要通过减小试验速率来推迟第一个锯齿的发生（见图 2-39），可在试验初始用较低的应变速率来测量屈服强度，而后适当增加应变速率来完成试验。

**4. 原始横截面积的测定**

试样的原始横截面积是通过对试样尺寸的适当测量而计算出来的，使用的长度测量仪器误差不应超过 0.5% 或 0.010mm，取其较大者。

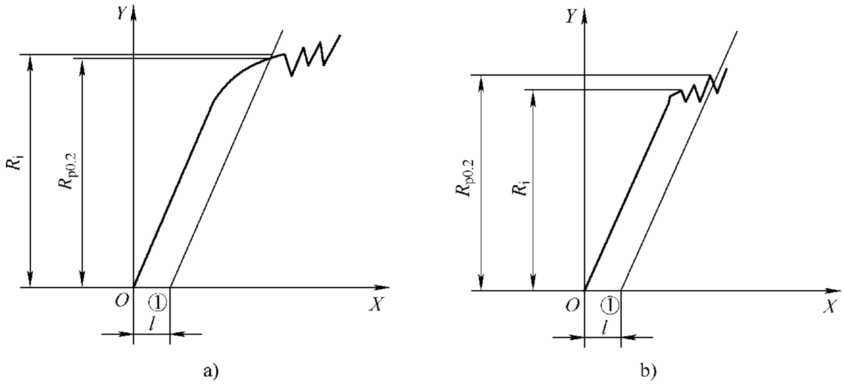



图 2-39　应力-应变曲线图

a）在 0.2% 塑性应变之后发生锯齿现象　b）在 0.2% 塑性应变之前发生锯齿现象

X—应变　Y—应力　$R_i$—不连续屈服强度　$R_{p0.2}$—0.2% 规定塑性延伸强度

① 0.2% 偏置。

**5. 原始标距的标记**

在试样平行长度内的适当位置，可以使用墨水或画线器进行标记。在进行标记之后，需要对原始标距进行测量，测量精确到 0.1mm。

对于延展性低的金属，在其平行长度上采用打点或画线的方法进行标记，可能由于应力集中而导致试验失败。为了避免这种情况，可以使用墨水在试样的平行长度内喷涂表面涂层，然后取适当的间距在试样表面刮掉涂层，从而达到标记原始标距的目的。也可以使用试样的台阶或试样的全长作为原始标距来计算延伸率，在这种情况下有可能由于测量截面发生改变而产生误差，因此测量结果也是有局限性的。

**6. 常规力学性能的测定**

断后伸长率 $A$、规定塑性延伸强度 $R_p$、抗拉强度 $R_m$、断面收缩率 $Z$ 的测定方法均与室温拉伸试验时相同，只是试验需要在液氦温度（4K）下进行。

**7. 不连续屈服强度（$R_i$）的测定**

用应力-应变曲线中第一个可测量的锯齿开始时的最大试验力除以试样的原始横截面积得到不连续屈服强度。

## 2.5　金属材料高温拉伸试验

金属材料高温拉伸试验按照 GB/T 4338—2006《金属材料高温拉伸试验方法》进行。

### 2.5.1　试样

金属材料高温拉伸试样的制备与室温拉伸试样的制备完全相同。

### 2.5.2　试验设备

**1. 试验机**

试验机的准确度级别应符合 GB/T 16825.1 的要求，并应为 1 级或优于 1 级，除非

产品标准另作规定。

**2. 引伸计**

引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160 的要求。当使用引伸计测量伸长时，对于上、下屈服强度及规定塑性延伸强度，应使用不低于 1 级准确度的引伸计；当测量试样有较大延伸率性能时，可使用不低于 2 级准确度的引伸计。

引伸计标距应不小于 10mm，并置于试样平行长度的中间部位，建议优先采用能测量试样两个侧面伸长的双面引伸计。

引伸计伸出加热装置外部分的设计应能防止气流的干扰，以使环境温度的变化对引伸计的影响减至最小。最好保持试验机周围的温度和空气流动速度适当稳定。

**3. 加热装置**

（1）温度的允许偏差　加热装置应能使试样加热到规定温度 $t$。温度的允许偏差和温度梯度如表 2-28 所示。温度梯度是指由加热装置等产生的沿试样轴向方向存在的固定的温度差值。

**表 2-28　温度的允许偏差和温度梯度**　（单位：℃）

| 规定温度 $t$ | $t_i$ 与 $t$ 的允许偏差 | 温度梯度 |
|---|---|---|
| $t \leqslant 600$ | ±3 | 3 |
| $600 < t \leqslant 800$ | ±4 | 4 |
| $800 < t \leqslant 1000$ | ±5 | 5 |

注：$t_i$ 为指示温度。

加热装置均热区应不小于试样标距长度的两倍。

对于高于 100℃的试验，温度允许偏差应由有关双方协商确定。

指示温度 $t_i$ 是指在试样平行长度表面上所测量的温度。测定各项性能时，均应使温度保持在表 2-28 规定的范围内。

（2）温度测量装置　温度测量装置的最低分辨力为 1℃，允许误差应在 ±0.004$t$ 或 ±2℃之内，取其大值。热电偶应符合 JJG 141、JJG 351 的要求，应不低于 2 级。

（3）温度测量系统的检验　温度测量系统应在试验温度范围内检验，检验周期不超过 3 个月。如果温度测量系统能每天自动标定，或过去的连续检验已经表明无需调节测量装置均能符合规定要求，校验的周期可以延长，但不得超过 12 个月。检验报告中应记录误差。

## 2.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试样的加热**

将试样逐渐加热至规定温度。加热过程中，试样的温度不应超过规定温度偏差上限，达到规定温度后至少保持 10min，然后调整引伸计零点。

**2. 温度的测量**

热电偶测温端应与试样表面有良好的热接触，并避免加热体对热电偶的直接热辐射。当试样标距小于 50mm 时，应在试样平行长度内两端各固定一支热电偶；标距等于或大于 50mm 时，应在平行长度的两端及中间各固定一支热电偶。如果从经验中已知加

热炉与试样的相对位置保证试样温度的变化不超过表 2-28 的规定时，热电偶的数目可以减少。

热电偶测温端直接固定于加热装置内时，必须经校验以保证指示温度与试样表面温度的一致性。当其温度一致时再计保温时间。

**3. 试验力**

应对试样无冲击地施加力，力的作用应使试样连续产生变形。试验力轴线应与试样轴线一致，以使试样标距内的弯曲或扭转减至最小。

**4. 试验速率**

（1）测定屈服强度时的试验速率　测定上屈服强度、下屈服强度和规定塑性延伸强度时的试验速率按如下要求：

1）试验开始至达到屈服强度期间，试样的应变速率应在 0.01～0.05/min 之间尽可能保持恒定，仲裁试验采用中间应变速率。

2）当试验系统不能控制应变速率时，应调节应力速率，使在整个弹性范围内试样应变速率保持在 0.003/min 以内，任何情况下，弹性范围内的应力速率不应超过 300MPa/min。

（2）测定抗拉强度时的试验速率　包括以下内容：

1）如果仅测定抗拉强度，试样的应变速率应在 0.02～0.20/min 之间尽量保持恒定，仲裁试验采用中间应变速率。

2）如果在同一试验中也测定屈服强度，从测定屈服强度时的试验速率中要求的应力速率到上述规定速率的改变应均匀连续。

**5. 高温拉伸性能的测定**

断后伸长率 $A$、规定塑性延伸强度 $R_p$、抗拉强度 $R_m$、上屈服强度 $R_{eH}$、下屈服强度 $R_{eL}$、断面收缩率 $Z$ 的测定方法均与室温拉伸试验时相同。

## 2.6　金属超塑性材料拉伸试验

金属超塑性材料拉伸试验按照 GB/T 24172—2009《金属超塑性材料拉伸性能测定方法》进行。

具有超塑性特性的金属材料可产生超塑性变形。超塑性材料拉伸试验可用来测定材料的超塑性性能，包括：超塑性伸长率 $A$、流变应力 $\sigma_f$、应变速率敏感性指数 $m$、应力-应变关系式和流变应力-应变关系式等。

### 2.6.1　试样

试样分板状试样和圆柱状试样，其中板状试样包括 S 型试样和 R 型试样。

1）S 型试样的形状如图 2-40 所示，尺寸如表 2-29 所示。

**表 2-29　S 型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 原始标距 $L_o$ | 平行长度 $L_c$ | 平行部分的宽度 $b$ | 圆角半径 $R$ |
|---|---|---|---|
| 18 | 24 | 6 | ≤3 |

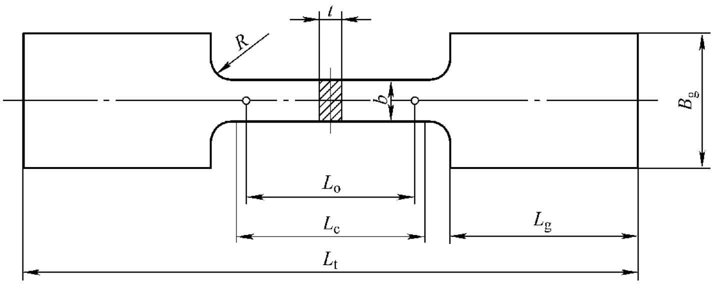



图 2-40　S 型试样的形状

$B_g$—夹持部分宽度（mm）　$b$—平行边宽度（mm）　$L_o$—原始标距（mm）　$L_c$—平行长度（mm）　$L_t$—试样总长度（mm）　$t$—试样厚度（mm）　$L_g$—夹持部分长度（mm）　$R$—圆角半径（mm）

推荐的试样尺寸按下面两式计算：

$$L_t = 2L_g + L_c + 2R$$

$$B_g = 3b$$

式中　$L_t$——试样总长度，单位为 mm；
$L_g$——夹持部分长度，单位为 mm；
$L_c$——平行长度，单位为 mm；
$R$——圆角半径，单位为 mm；
$B_g$——夹持部分宽度，单位为 mm；
$b$——平行边宽度，单位为 mm。

2）R 型试样的形状如图 2-41 所示，尺寸如表 2-30 所示。

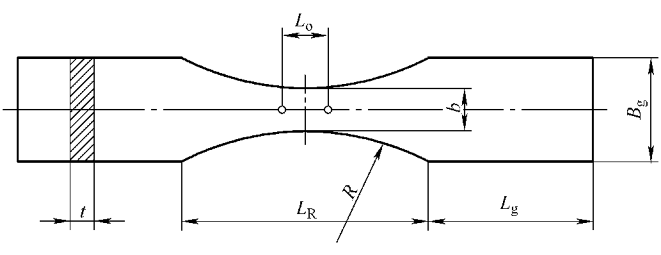



图 2-41　R 型试样的形状

$B_g$—夹持部分宽度（mm）　$b$—平行边宽度（mm）　$L_o$—原始标距（mm）　$L_R$—R 部分的原始长度（mm）　$t$—试样厚度（mm）　$L_g$—夹持部分长度（mm）　$R$—圆角半径（mm）

**表 2-30　R 型试样的尺寸**　　（单位：mm）

| 夹持部分宽度 $B_g$ | R 部分最小宽度 $b$ | R 部分长度 $L_R$ | R 部分半径 $R$ | 原始标距 $L_o$ |
|---|---|---|---|---|
| 16 | 6 | 30 | 25 | 6 |

注：$L_g$ 不小于 20mm。

3）圆柱状试样的形状如图 2-42 所示，尺寸如表 2-31 所示。

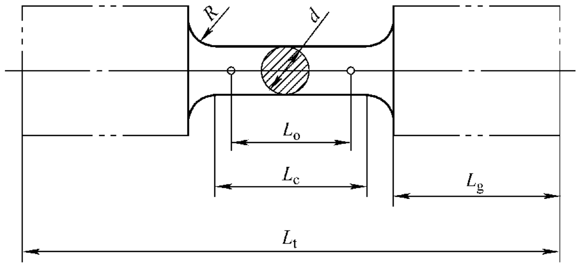



图 2-42　圆柱状试样的形状

$L_o$—原始标距（mm）　$L_c$—平行长度（mm）　$L_t$—试样总长度（mm）
$d$—试样直径（mm）　$L_g$—夹持部分长度（mm）　$R$—圆角半径（mm）

**表 2-31　圆柱状试样的尺寸**　　（单位：mm）

| 平行部分直径 $d$ | 原始标距 $L_o$ | 平行长度 $L_c$ | 圆角半径 $R$ |
|---|---|---|---|
| 5 | 20 | 25 | ≤2.5 |

## 2.6.2　试验设备

**1. 试验机**

试验机应符合 GB/T 16825.1 的要求。横梁分离速率应保持恒定。根据协议选择合适的试验准确度级别。

**2. 试样夹具**

试样夹具在高温条件下应不产生塑性变形。试样夹持时，应注意使试样在试验过程中仅受到轴向力的作用，并且在试验加载之前的加热和保温期间，使试样不承受任何压力，承受最小的拉力。同时，应避免夹具自身重量作用于试样。

**3. 加热装置**

使用带温控器的加热炉加热试样。试验期间，加热炉应能保持整个试样标距范围内的温度均匀恒定，温度偏差应在表 2-32 允许范围内。

**表 2-32　温度的允许偏差**　　（单位：℃）

| 试验温度 | ≤200 | >200~600 | >600~800 | >800~1000 | >1000 |
|---|---|---|---|---|---|
| 允许偏差 | 双方协议 | ±3 | ±4 | ±5 | 双方协议 |

**4. 气氛**

试样尺寸的测量，尤其是试验后的试样标距及分段线间的距离的测量应能得以进行，并应避免仪器在使用的环境中损坏。如果试验在控制的气氛下进行，所测量的力值应通过补偿压力差进行修正。

**5. 测温装置**

（1）测温仪　测温仪应能够指示试样在表 2-32 规定的允许温度范围内的所有温度。

（2）热电偶　热电偶应符合 JJG 141 和 JJG 351 的规定，而且组成热电偶的材料应能够适应试验温度和试验环境的要求。

使用不同于热电偶的测温仪器时，其准确度应不小于热电偶的准确度。

## 2.6.3　试验内容及结果表示

**1. 测温**

1）采用规定的热电偶测量试验温度。所测试的温度应该是试样的温度，该温度为测量热电偶在试样表面接触点处的温度。热电偶应避免加热炉的直接热辐射。如果试样表面温度与加热炉中某个特定位置的温度在试验前被标定有对应性，测温方式可以灵活掌握。

2）更准确地测量至少要在不同的位置安装两支热电偶。

3）应确定试样的加热时间和试验前的保温时间。

4）在试验过程中，应使试验温度保持在表 2-32 规定的偏差范围内。

**2. 施加试验力**

试验要求横梁分离速率保持恒定。

**3. 试样尺寸的测量**

测量标距的仪器应有足够的精密度，至少为规定尺寸的 1% 或者 0.01mm，取其大者。应用小标记或细画线标记。原始标距不应用导致试样过早断裂的刻痕作标记。

**4. 超塑性伸长率的测定**

试验前 S 型试样选择标距为 18mm，R 型试样选择标距为 6mm，圆柱状试样选择标距为 20mm。按下式计算超塑性伸长率：

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$A$——超塑性伸长率（%）；

$L_u$——断后标距，单位 mm；

$L_o$——原始标距，单位 mm。

注意测量断后标距时，将断后试样仔细对接在一起，使其轴线在同一条直线上。

**5. S 型试样和圆柱形试样流变应力和应变速率敏感性指数的测定**

（1）流变应力的测定　通过试验中力所对应的伸长量的变化绘制力-伸长曲线图。测量仪器要有足够的准确度，以保证在超塑性条件下所测的力值满足载荷传感器的准确度。

10% 的流变应力通过下式计算：

$$\sigma_{10} = \frac{1.1F_{10}}{S_o}$$

式中　$\sigma_{10}$——10% 流变应力，单位为 MPa；

$F_{10}$——10% 的标称应变下的力值，单位为 N；

$S_o$——试样的原始横截面积，单位为 $mm^2$。

（2）应变速率敏感性指数 $m$ 的测定　在特定的温度和微观结构条件下，在超塑性变形过程中，流变应力 $\sigma_f$ 和应变速率 $\varepsilon$ 间的关系可用下式计算：

$$\sigma_f = K\dot{\varepsilon}^m$$

式中　$\sigma_f$——流变应力，单位为 MPa；

$\varepsilon$——应变速率，单位为 $s^{-1}$；

$m$——应变速率敏感性指数。

$K$——带应力量纲的常数。

上式中未考虑应变硬化的因素，因此上式只有材料的应变硬化影响可以忽略时才成立。

采用五个或五个以上不同横梁分离速率进行试验，通过描点可绘制出每个横梁分离速率下 10% 流变应力和相应标称应变速率间关系的对数-对数坐标图，用最小二乘法对上述关系作线性回归，求得直线的斜率即 $m$ 值。

**6. R 型试样 *m* 值的测定**

应变速率敏感性指数 $m$ 值应通过试验中断前试验力和试样尺寸的测量来测定。采用两个或两个以上的横梁分离速率拉伸试样，当 R 部分的伸长量达到指定值时中断试验。

在选择最小和最大的横梁分离速率时，应使它们之间的差值在 2 ~ 10 倍之间。R 部分的伸长量通常被指定为 3mm ± 0.5mm，这个变形量可认为是在起始形变过程中的伸长量。对于每一次试验，可以将每一个分段线上（见图 2-43）的真应力 $\sigma$（$i$）和真应变速率 $\dot{\varepsilon}$（$i$）测出。

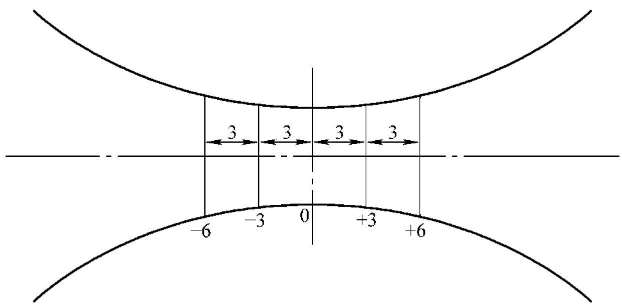



图 2-43　R 部分的分段线图

1）如图 2-43 所示，在 R 部分的中间区域，在拉伸轴方向以 3mm 的间距绘制五个分段线，将试样拉伸轴沿水平方向放置，R 部分中心部位最小横截面积处的分段线称为 0 线，其左边的分别称为 −6 和 −3 线，右边的分别称为 +3 和 +6 线。

2）试验前测量 R 部分各分段线处相应的宽度 $b_o$（$i$）（$i$ = −6，−3，0，+3，+6）和厚度 $t_o$（$i$），计算相应的横截面积 $S_o$（$i$）。

3）当 R 部分的伸长 $\Delta L_R$ 达到 3mm 时停止试验，记录该点力值和所用时间 $\tau_{inter}$，$\tau_{inter}$指力从弹性阶段轴向力开始线性增加到停止试验的时间。

4）测量停止试验后试样 R 部分相应于各分段线处的宽度 $b$（$i$）和厚度 $t$（$i$），计算相应的横截面积 $S$（$i$）。测量仪器应保证足够的准确度。

5）按下面公式计算每个分段线处的流变应力 $\sigma$（$i$）和真应变 $\varepsilon$（$i$）：

$$\sigma(i)=\frac{F}{S(i)}$$

$$\varepsilon(i)=\ln\frac{S_o(i)}{S(i)}$$

6）由真应变 $\varepsilon$（$i$）和变形时间 $\tau_{inter}$ 导出各分段的真应变速率 $\dot{\varepsilon}$（$i$）：

$$\dot{\varepsilon}(i)=\frac{\varepsilon(i)}{\tau_{linter}}$$

7）采用两个或两个以上的横梁分离速率，测得每个分段线上的 $\sigma(i)$ 和 $\dot{\varepsilon}(i)$，绘制对数描点图后，进行线性回归分析，求得直线的斜率即 $m$ 值，如图 2-44 所示。在这种情况下，为了等同地处理横截面的数据，0 分段线的数据应予以两倍加权进行线性回归分析。

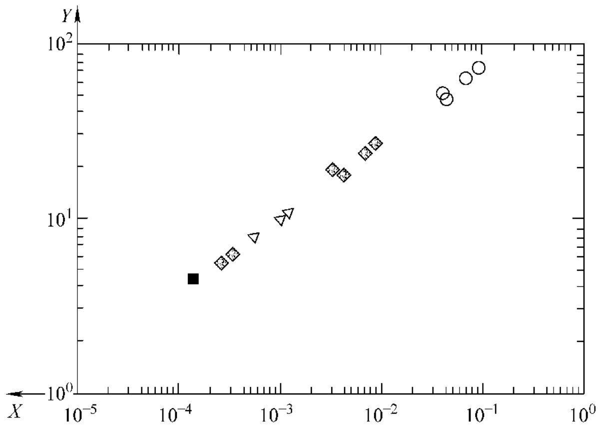



图 2-44　超塑性合金应力-应变速率关系图例

X—真实应变速率 $\dot{\varepsilon}$（$s^{-1}$）　Y—真应力 $\sigma$（$i$）（MPa）　■—$5.0\times10^{-6}$

▽—$1.7\times10^{-5}$　◈—$1.7\times10^{-4}$　○—$1.7\times10^{-3}$

**7. 试验结果数值的修约**

将超塑性伸长率 $A$、应变速率敏感性指数 $m$、10% 流变应力 $\sigma_{10}$ 按 GB/T 8170 修约到小数点后两位。

## 2.7　金属材料单轴拉伸蠕变试验

金属材料单轴拉伸蠕变试验按照 GB/T 2039—2012《金属材料　单轴拉伸蠕变试验方法》进行。

### 2.7.1　试样

**1. 形状和尺寸**

1）一般情况下，试样加工成圆形比例试样（$L_{ro}=k\sqrt{S_o}$）（见图 2-45），$k$ 值应大于或等于 5.65 并在试验报告中记录 $k$ 的取值，例如：$L_{ro}\geqslant5D$。$L_{ro}$是参考长度，指试验开

始前在室温情况下测定的参考长度。

2）特殊情况下，还有矩形、方形或其他形状横截面的试样。对于圆形试样的要求不适用于特殊试样。

3）通常情况下，对于圆形试样，$L_{ro}$应不大于 1.1 倍的 $L_c$；对于方形或矩形横截面试样，$L_{ro}$应不大于 1.15 倍的 $L_c$。

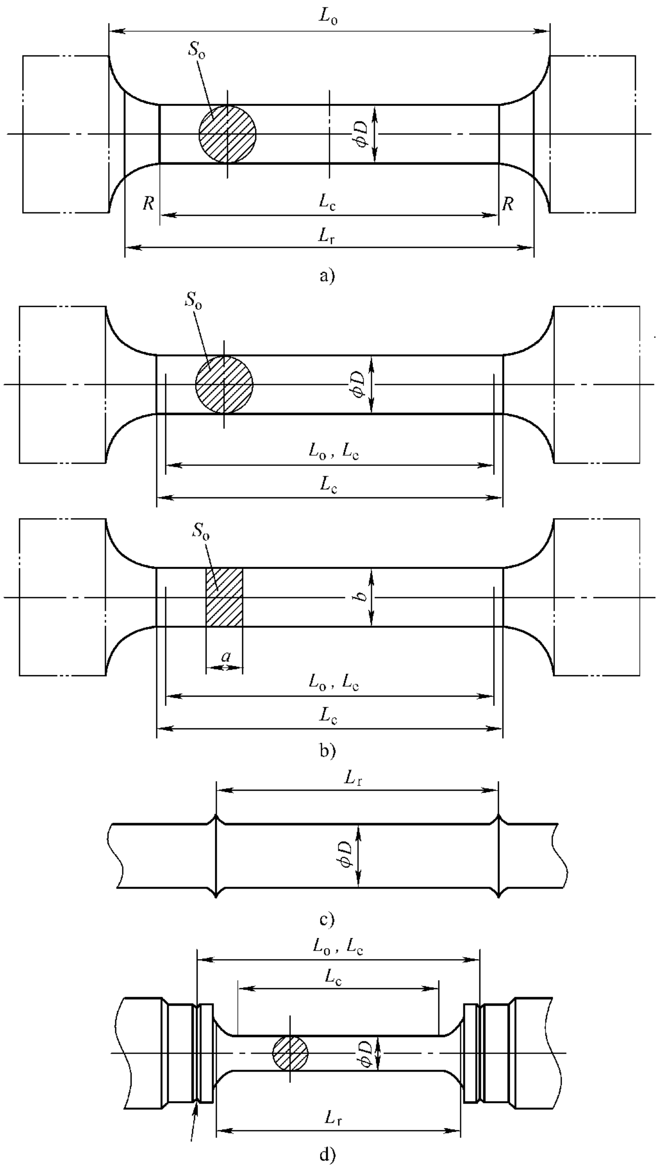
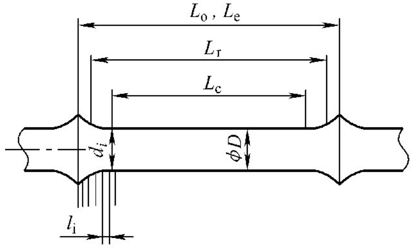



图 2-45　试样示例图

a）标距在平行长度以外的台肩试样　b）标距在平行长度以内的台肩试样

c）带小凸台试样　d）试样标距在平行长度以外的台肩试样




e)

图 2-45　试样示例图（续）

e）凸台试样

$D$—圆形试样平行长度部分的直径（mm）　$S_o$—平行长度内原始横截面积（mm）　$L_o$—原始标距（mm）　$L_c$—平行长度（mm）　$L_r$—参考长度（mm）　$R$—过渡弧半径（mm）　$L_e$—引伸计标距（mm）　$a$—方形或矩形横截面试样的厚度（mm）　$b$—方形或矩形横截面试样的宽度（mm）　$l_i$—过渡部分的长度增量（mm）　$d_i$—与 $l_i$ 对应的直径（mm）

注：1. 图 2-45a 中的 $L_r$ 按下式求出：

$$L_r = L_c + 2\sum_i [(D/d_i)^{2n} l_i]$$

式中　$n$——试验温度下试验材料的应力指数，如果未知的话，通常取 $n = 5$；

$l_i$——过渡部分的长度增量，单位为 mm。经验表明，$l_i = 0.1$mm 适合计算；

$L_r$——参考长度，单位为 mm；

$L_c$——平行长度，单位为 mm；

$d_i$——与 $l_i$ 对应的直径，单位为 mm；

$D$——圆形试样平行长度部分的直径，单位为 mm。

2. 图 2-45c 中，$L_r = L_o$ 或 $L_e$。

3. 图 2-45a 中的 $L_r$ 按下式求出：

$$L_r = L_c + 2\sum_i [(D/d_r)^{2n} l_i]$$

4）平行段应用过渡弧与试样夹持端连接，夹持端的形状应和试验机的夹持端相适应。对于圆柱形试样，过渡弧半径 $R$ 应在 $0.25D \sim 1.0D$ 之间；对于方形或矩形截面试样，过渡弧半径 $R$ 应在 $0.25b \sim 1.0b$ 之间。在特殊情况尤其是对于脆性材料，过渡弧半径可以大于 $1.0D$。

5）除非试样尺寸不够，原始横截面积 $S_o$ 应大于等于 $7\text{mm}^2$。

6）当采用在平行段的凸台上安装引伸计时，凸台的过渡弧半径可以小于 $0.25d$；凸台过渡弧的选择必须尽量减小应力集中，并且应检验确保圆弧没有过切。对于有凸合试样，凸台和夹持端之间的试样直径可能比原始标距内直径大 10%。这是为了确保试样断裂发生在试样标距之内。

7）试样夹持端与试样平行段的同轴度误差为：①对于圆形试样，$0.005D$ 或者 0.03mm，取二者中较大者；对于方形或矩形试样，$0.005b$ 或者 0.03mm，取二者中较大者。

8）当氧化成为重要影响因素时，可以选择较大原始横截面积 $S_o$ 的试样。

9）原始参考长度的测量应准确至 ±1%，断后参考长度与原始参考长度的差值应准确至 0.25mm。

10）对于缺口试样，有 V 形缺口试样和钝环形缺口试样两种。在拉伸和蠕变试验中测定 V 形缺口试样的试验时间，来反映诸如零件螺纹部分的材料特性。通常，采用的是同一试样上的较大直径处加工出与试样平行段相同横截面积的缺口的复合试样，如图 2-46 所示。此类试样主要用于测定材料是否“缺口强化”，也就是首先断在试样的平行段，或者“缺口弱化”，也就是试样断在缺口部分。显然，使用复合试样不能测定具体的缺口敏感性系数，如果要测定缺口敏感性系数必须在相同的净截面应力条件下对光滑和缺口试样分别试验。

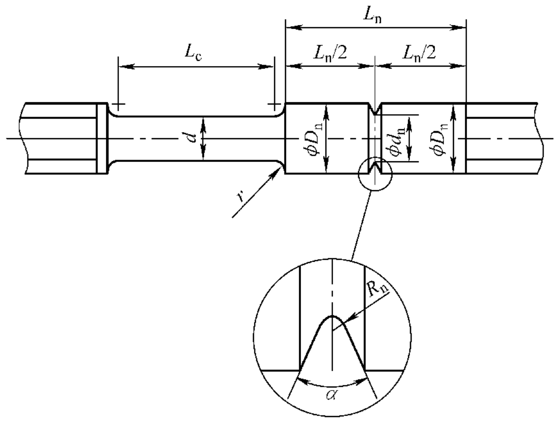



图 2-46　缺口和无缺口复合试样

钝环形缺口的拉伸蠕变试样是在多轴应力下评价材料行为的简易低成本方法，此外，这种应力状态也与工业制成零部件的服役条件相类似。工业生产中需要研究材料在三轴拉伸应力条件下材料的蠕变性能时，钝环形试样可以提供比 V 形缺口试样更宽的范围，并给出在这些情况下蠕变变形是如何累积的。缺口拉伸试验是实现这个目的的最直接的方法，尤其是通过改变缺口轮廓来获得较宽的应力水平的范围。三种经典的缺口轮廓如图 2-47 所示。

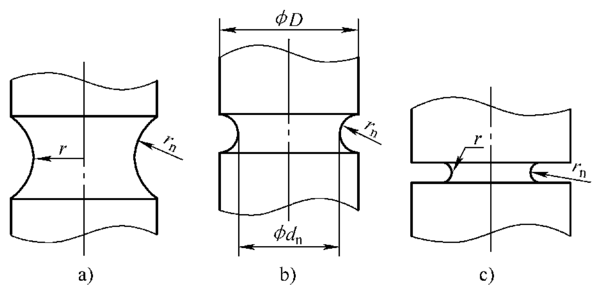



图 2-47　缺口试样

a）钝环形　b）半环形　c）平行边形

**2. 试样的制取**

1）试样应通过机加工的方法使得试样表面缺陷或残余变形降到最低。

2）圆形截面试样的几何公差如表 2-33 所示，方形或矩形截面试样的几何公差如表 2-34 所示。

**表 2-33　圆形截面试样的几何公差**　　（单位：mm）

| 公称直径 $D$ | 几何公差① | 公称直径 $D$ | 几何公差① |
|---|---|---|---|
| $3 < D \leqslant 6$ | 0.02 | $10 < D \leqslant 18$ | 0.04 |
| $6 < D \leqslant 10$ | 0.03 | $18 < D \leqslant 30$ | 0.05 |

① 在整个平行长度，横向上测量试样直径的最大偏差。

表 2-34　方形或矩形截面试样的几何公差　（单位：mm）

| 公称尺寸 $b$ | 几何公差① | 公称尺寸 $b$ | 几何公差① |
|---|---|---|---|
| $3<b\leqslant6$ | 0.02 | $10<b\leqslant18$ | 0.04 |
| $6<b\leqslant10$ | 0.03 | $18<b\leqslant30$ | 0.05 |

① 在整个平行长度上，横向上测量试样宽度的最大偏差。

3）建议最小原始横截面积处于平行长度或参考长度的中间 2/3 以内，取二者较小值。

4）对于缺口试样（见图 2-46 和图 2-47），应检查缺口尺寸是否满足相关产品标准中对尺寸偏差的要求。

**3. 原始标距的标记**

使用打点、标线及其他方法标记原始标距的两端，应注意不能使用导致试样提前断裂的缺口来标记原始标距。

经标记的原始标距应准确至 ±1%。

有些情况下，为了帮助标记标距，会在试样表面画一条平行于试样纵轴的线，来标记原始标距。当使用带小凸台的试样时（见图 2-47c），标距 $L_o$ 可以不做标记。

**4. 参考长度的测定**

当引伸计安装在平行段的凸台或试样的肩部时（见图 2-47c），参考长度应按下式计算：

$$L_r = L_c + 2\sum_i\left[(D/d_i)^{2n} l_i\right]$$

式中　$n$——试验温度下试验材料的应力指数，如果未知的话，通常取 $n=5$；

$l_i$——过渡部分的长度增量，单位为 mm。经验表明，$l_i=0.1$mm 适合计算；

$L_r$——参考长度，单位为 mm；

$L_c$——平行长度，单位为 mm；

$d_i$——与 $l_i$ 对应的直径，单位为 mm；

$D$——圆形试样平行长度部分的直径，单位为 mm。

## 2.7.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机应能提供施加轴向试验力并使试样上产生的弯矩和扭矩最小。试验前，应对试验机进行外观检查，以确保试验机的加力杆、夹具、万向节和连接装置都处于良好状态。

2）试验力应均匀平稳无振动地施加在试样上。

3）试验机应远离外界的振动和冲击。试验机应具有试样断裂时将振动降到最小的缓冲装置。

4）试验机至少应符合 GB/T 16825.2 中 1 级试验机的要求。

5）为了保证试验机和夹具能够对试样准确地施加试验力，应定期校准试验机的力值和加载同轴度，试验机的加载同轴度应不超过 10%。试验设备两次校准/检定的时间间隔依据设备类型、试验条件、维护水平和使用频次而定，除非另有规定，校准/检定

周期不应超过 12 个月。试验机的校准/检定参考 JJG 276。如果能够证明试验设备在更长的时间内能够满足相关规定的要求，那么可以延长两次校准/检定之间的时间。

**2. 伸长测量装置**

1）对于连续试验，应使用引伸计测量试样的伸长。引伸计系统应满足 GB/T 12160 中 1 级或优于 1 级准确度的要求，或者采用能够满足相同准确度要求的其他设备。可以采用直接安装在试样上的引伸计，也可以采用非接触式的引伸计，例如：光学或激光引伸计。

2）建议引伸计校准的范围应包含预期的蠕变应变量。

3）引伸计应每年校准一次，除非试验时间超过 1 年。如果预期试验时间超过校准周期，应在蠕变试验开始前对引伸计重新校准。

4）引伸计的标距应不小于 10mm。

5）引伸计应该可以测量试样单侧或双侧的伸长，双侧引伸计作为优先选择。

6）在报告中应注明所使用的引伸计类型（例如：单侧、双侧、轴向、径向）。当使用双侧引伸计测量试样伸长时，应报告平均伸长。对于连续蠕变试验，引伸计直接安装在试样的平行部分，依据引伸计标距 $L_e$ 测量蠕变伸长率。

7）当引伸计安装在试样的夹持末端来测量蠕变伸长时，末端的外形和尺寸应保证能够在试样的参考长度内完全准确地测定伸长。依据参考长度 $L_r$ 测量蠕变伸长率。

8）通常，引伸计的标距应尽可能地接近参考长度。为了提高测量准确度，标距应尽可能的大。

9）如果仅仅测量蠕变断裂后的残余伸长或规定时间的残余伸长，则不必使用引伸计。

10）对于不连续试验，试样卸载后冷却到室温，采用合适的工具测量标距长度的残余伸长。测量工具的精度应达到 $0.01\Delta L_r$ 或 0.01mm，取其大者。完成测量后，试样可以再次升温和加载。

11）对于采用短标距试样的小应变试验，例如应变小于等于 1%，需要仔细选用具有足够分辨力的测量装置。

12）当使用镍基合金材料的引伸计时，应注意避免虚假的负蠕变。

**3. 加热装置**

1）采用加热装置加热试样至规定温度（$T$）。规定温度（$T$）和显示温度（$T_i$）之间的允许偏差和试样长度方向上允许的最大偏差如表 2-35 所示。

**表 2-35　$T_i$ 与 $T$ 的允许偏差和试样长度方向上允许的最大偏差**

| 规定温度 $T$/℃ | $T_i$ 与 $T$ 的允许偏差/℃ | 试样长度方向上允许的最大温度偏差/℃ |
|---|---|---|
| $T \leqslant 600$ | ±3 | 3 |
| $600 < T \leqslant 800$ | ±4 | 4 |
| $800 < T \leqslant 1000$ | ±5 | 5 |
| $1000 < T \leqslant 1100$ | ±6 | 6 |

2）对于规定温度超过 1100℃的试验，应由双方协商确定温度的允许偏差。

3）显示温度（$T_i$）是在试样的平行段表面测得的，应考虑所有来源的误差并对系

统误差进行修正。

4）允许采用加热炉各个加热区间温度的间接测量方式来代替直接测量试样表面温度，这种方式必须证实能满足上述偏差的要求。

5）如果使用引伸计，则应考虑某种方法保护炉外的引伸计部分不会由于炉外空气温度的波动而对长度测量产生太大影响。

6）读取引伸计测量数值时，试验机环境温度波动应不超过 ±3℃。

7）对于不连续试验，标距测量时的环境温度波动应不超过 ±2℃。如果超过这个范围，应考虑环境温度变化带来的影响。

**4. 热电偶**

1）热电偶的测量端与试样表面应保持良好的热接触，并应该屏蔽以避免热源的直接辐射。炉内电偶丝其余部分应该有热防护和电绝缘。

2）对于试验时间较短（通常不超过 500h）的热电偶至少应每 72 个月校准/检定一次。对于试验时间超过 12 个月的贵金属热电偶应按以下要求校准/检定：①规定温度低于等于 600℃的每四年校准/检定一次；②规定温度高于 600℃而低于等于 800℃的每两年校准/检定一次；③规定温度高于 800℃的每一年校准/检定一次。

3）如果试验时间超过了校准/检定周期，应在试验完成后立即校准/检定。如果热电偶重新焊接，则应在使用前再次校准/检定。

4）应对试验温度或者包含试验温度的典型区间对热电偶的偏差进行标定。

5）如果能够证明热电偶的偏差不影响规定允许的温度波动的，那么可以延长两次校准/检定之间的时间。

6）由于热电偶污染造成化学成分变化导致的温度漂移，以及人为处置的物理损伤都会导致热电偶输出值的变化。这些变化应该记录下来，并且如果要查询应该能够查到。

7）温度波动是由所使用的热电偶类型以及在试验温度下的暴露时间决定的。

8）如果热电偶的漂移影响超出温度的允许偏差，则应提高校准/检定的频次，或者通过热电偶的显示值对温度进行修正。

## 2.7.3　试验内容及结果表示

**1. 试样的加热**

1）试样应加热至规定的试验温度。试样、夹持装置和引伸计都应达到热平衡。

2）试样应在试验力施加前至少保温 1h，除非产品标准另有规定。对于连续试验，试样保温时间不得超过 24h；对于不连续试验，试样保温时间不得超过 3h，卸载后试样保温时间不得超过 1h。

3）升温过程中，任何时间试样温度不得超过规定温度所允许的偏差。如果超出，应在报告中注明。

4）对于安装引伸计的蠕变试验，可以在升温过程中施加一定的初负荷（小于试验力的 10%），来保持试样加载链的同轴。

**2. 温度测量**

1）温度显示装置的分辨力至少应为0.5℃，测温装置的准确度应等于或优于1℃。

2）对于单头试验机，试样的平行长度小于或等于50mm的应至少使用2支热电偶。对于平行长度超过50mm的试样，应至少使用3支热电偶。任何情况下应将热电偶固定在试样平行长度的两端，如果使用3支热电偶，应在试样平行长度的中段固定1支热电偶。

3）如果证实加热炉能够使试样上的温度波动不超过相关的规定，那么热电偶的数量可以减少为1支。

4）对于多头试验机，建议每个试样上至少固定1支热电偶。如果只用1支热电偶，应固定在试样平行长度的中间位置。如果仅在炉内安装3支控温热电偶，必须要有充分的数据证明每个试样的温度满足相关的要求。

5）对于间接测温装置，要求有规律地测量每个加热区间内热电偶与给定区间内一定数量试样上的温度差值数据。对于温度差的非系统部分，800℃以下不超过±2℃，800℃以上不超过±3℃。

**3. 施加试验力**

1）试验力应以产生最小的弯矩和扭矩的方式在试样的轴向上施加。

2）试验力至少应准确到±1%。试验力的施加过程应无振动并尽可能地快速。

3）应特别注意软金属和面心立方材料的加力过程，因为这些材料可能会在非常低的负荷下或室温下发生蠕变。

**4. 单轴拉伸蠕变性能的测定一般方法**

1）当初始应力对应的载荷全部施加在试样上时，作为蠕变试验开始并记录蠕变伸长，如图2-48所示。

2）为了获得足够多的伸长数据，可以多次周期性地中断试验：①多试样串联试验，一个试样断裂后，允许将其从试样链中取出并更换为新试样后继续试验；②意外中断，对于每次试验意外中断的原因（例如加热中断或停电），应在试验条件恢复后，记录在试验报告中。应确保不因试样收缩而导致试样上试验力的超载。

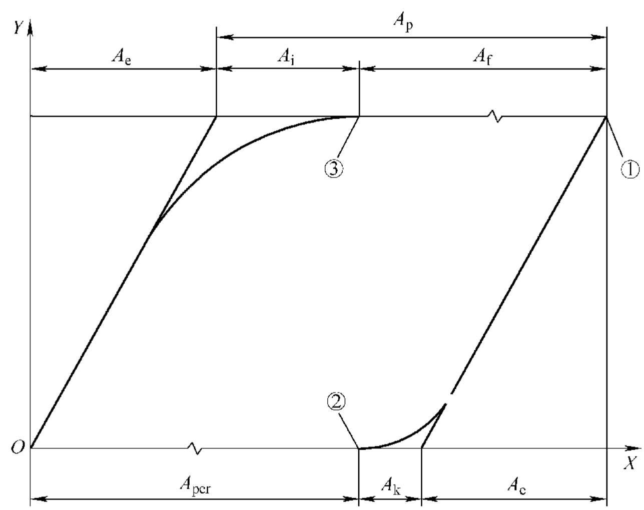



图2-48　应力-伸长率示意图

X—伸长率　Y—应力　$A_e$—弹性伸长率　$A_f$—蠕变伸长率

$A_i$—初始塑性伸长率　$A_k$—滞弹性伸长率

$A_p$—总塑性伸长率　$A_{per}$—残余伸长率

① 卸载开始。

② 卸载结束。

③ 加载结束。

建议在中断期间保持试样上的初始负荷。

3）在整个试验过程中，应充分记录试样的温度。

4）在整个试验过程中，应连续记录或记录足够多的伸长数据来绘制伸长率-时间曲线，如图2-49所示。

5）从图2-50中读出 $A_k$（滞弹性伸长率,%），从图2-51中即可读出 $A_f$（蠕变伸长率,%）、$A_u$（蠕变断裂后伸长百分率,%）、$A_i$（初始塑性伸长率,%）。

6）按下式计算 $A_p$（总塑性伸长率,%）、$A_{per}$（残余伸长率,%）、$Z_u$（蠕变断裂后断面收缩率,%）。

$$A_p = A_i + A_f$$

$$A_{per} = A_p - A_k$$

$$Z_u = \frac{S_o - S_u}{S_o} \times 100\%$$

式中　$S_o$——平行长度内原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$S_u$——断后最小横截面积，单位为 $mm^2$。

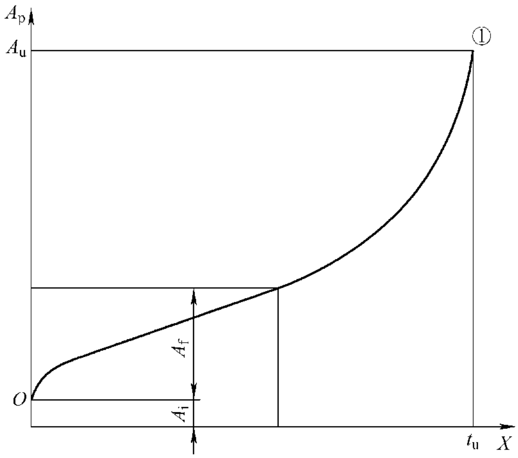



图2-49　伸长率-时间图

X—从加载结束时计时　$A_u$—蠕变断裂后伸长百分率

$A_f$—蠕变伸长率　$A_p$—总塑性伸长率

$A_i$—初始塑性伸长率　$t_u$—蠕变断裂时间

①试样断裂。

7）蠕变断裂强度（持久强度）是指在规定的试验温度 $T$ 下，依据应力 $\sigma_o$ 在试样上施加恒定的拉伸力，经过一定的试验时间（蠕变断裂时间 $t_u$）所引起断裂的应力 $\sigma_o$。蠕变断裂强度用符号 $R_u$ 表示，并以蠕变断裂时间 $t_u$（h）作为第二角标，试验温度 $T$(℃)为第三角标的符号来表示。例如，对于蠕变断裂时间 $t_u$ = 100000h、试验温度 $T$ = 550℃，即550℃下10000h所测定的蠕变断裂强度，用简短符号 $R_{u100000/550}$ 表示，单位为MPa。

8）规定塑性应变强度是指在规定的试验温度 $T$ 下，依据应力 $\sigma_o$ 在试样上施加恒定的拉伸力，经过一定的试验时间（达到规定塑性应变的时间 $t_{px}$）所能产生预计塑性应变的应力 $\sigma_o$。规定塑性应变强度用符号 $R_p$ 表示，并以最大塑性应变量 $x$(%)作为第二下角标，达到应变量的时间为第三下角标，试验温度 $T$（℃）为第四下角标的符号来表示。例如，对于最大塑性应变量为0.2%，达到应变时间为1000h，试验温度 $T$ = 650℃的规定塑性应变强度用简短符号 $R_{p0.2,1000/650}$ 表示，单位为MPa。

**5. 外推法**

应将在一个试验温度下单个材料的试验结果置于一系列的图表中进行评价，如图2-50和图2-51所示。在这些图中外推曲线用虚线表示，外推点用圆括号表示。

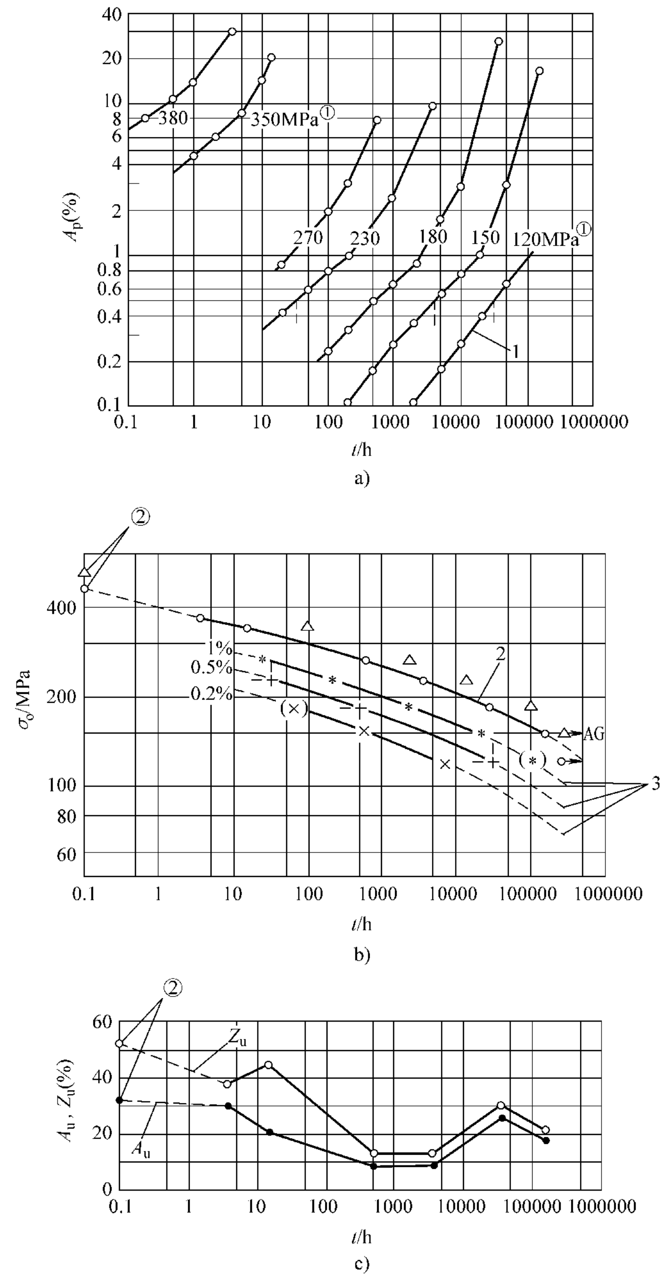



图 2-50　恒定温度和恒定试验力的结果表达示例图

a）蠕变图　b）蠕变断裂图　c）蠕变断裂变形图

1—蠕变曲线　2—蠕变断裂曲线　3—蠕变应变曲线　○—光滑试样（已断）　△—缺口试样（已断）

○→—试验进行中　△→AG—试验停止（未断）　----—外推曲线

①初始应力。

②高温拉伸试验。

采用外推方法的要点如下：

1）在处理蠕变数据时，经常需要确定蠕变断裂强度或应变强度对应最长试验时间的 $q_e$ 倍值，系数 $q_e$ 是外推时间与试验时间的比值，通常不超过 3。

2）如果外推的蠕变强度低于同一材料的最小初始应力时，建议注明外推时间与试验时间的比值 $q_e$，这种外推的不确定度通常较大。

3）在外推过程中，应考虑试验时间和/或试验温度会改变微观结构和断裂延伸值。选取外推方法时应注意此类问题。

4）对于相同材料建议标明外推时间与试验时间的比值 $q_e$，并且指出外推蠕变强度是否低于最小初始应力水平 $\sigma_{omin}$。当外推蠕变强度低于最小初始应力水平 $\sigma_{omin}$ 时，外推结果的不确定度通常较大。

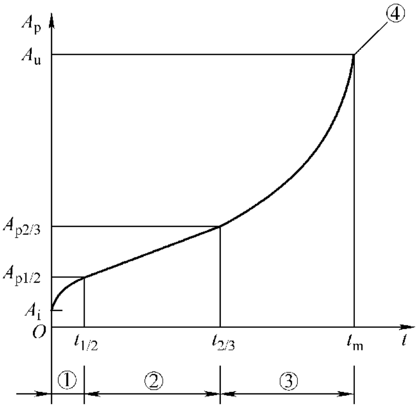



图 2-51　线性坐标的蠕变示意图

①第一阶段。

②第二阶段。

③第三阶段。

④断裂。

5）在外推过程中，应考虑微结构或蠕变断裂变形值的变化，它们与时间和/或试验温度有关。外推过程须作说明。

6）通常采用蠕变断裂曲线和/或蠕变应力曲线的延长的图解法来外推结果。相同试验温度下的邻近曲线随时间的转变（见图 2-52b）或不同试验温度，择优选较高试验温度的不同曲线（见图 2-52c），都有助于外推的有用提示。从蠕变应变曲线的延长线可以获得相同的信息。如果已经借助相邻曲线进行了图解法外推，应采用较小的外推时间与试验时间的比值 $q_e$（见图 2-52b 和图 2-52c）。

**6. 试验结果数值的修约**

试验结果的表示应按以下规定和 GB/T 8170 进行修约。

1）规定温度修约到 1℃。

2）直径修约到 0.01mm。

3）长径比修约到 1 位小数。

4）原始参考长度修约到 0.1mm。

5）初始应力修约到 3 位有效数字。

6）时间修约到 1% 或最接近的整小时（取较小值）。

7）伸长率修约到 3 位有效数字。

8）蠕变断后伸长率修约到 2 位有效数字。

9）蠕变断面收缩率修约到 2 位有效数字。

10）蠕变速率修约到 3 位有效数字。

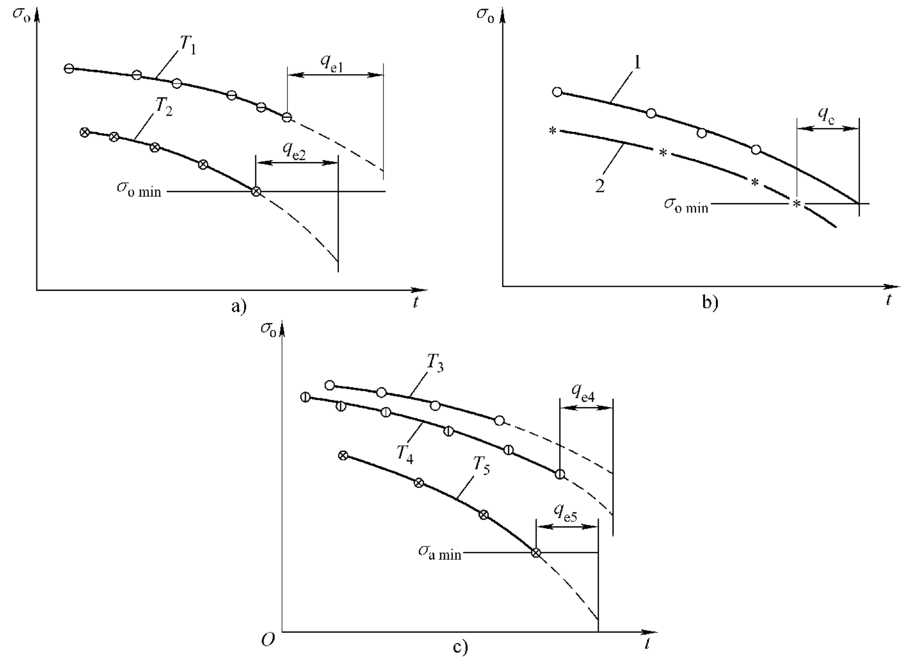



图 2-52　蠕变应变（断裂）图解法外推示例

a）蠕变断裂曲线（$T_1 < T_2$）　b）蠕变断裂和蠕变应变曲线（$T$ 为常数）　c）蠕变断裂曲线（$T_3 < T_4 < T_5$）

1—蠕变断裂曲线　2—时间应变曲线

## 2.8　金属材料焊接接头拉伸试验

金属材料焊接接头拉伸试验按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》进行。该试验方法适用于金属材料熔焊和压焊接头的拉伸试验。

### 2.8.1　试样

**1. 取样位置**

试样应从焊接接头垂直于焊缝轴线方向截取，试样加工完成后，焊缝的轴线应位于试样平行长度部分的中间。对小直径管试样可采用整管，未作特殊规定时，小直径管是指外径不大于 18mm 的管子。

**2. 标记**

1）每个试件应做标记以便识别其从产品或接头中取出的位置。

2）如果相关标准有要求，应标记机加工方向（例如轧制方向或挤压方向）。

3）每个试样应做标记以便识别其在试件中的准确位置。

**3. 热处理及/或时效**

焊接接头或试样一般不进行热处理，但相关标准规定或允许被试验的焊接接头进行热处理除外，这时应在试验报告中详细记录热处理的参数。对于会产生自然时效的铝合

金，应记录焊接至开始试验的间隔时间。

钢铁类焊缝金属中有氢存在时，可能会对试验结果带来显著影响，需要采取适当的去氢处理。

**4. 取样**

（1）一般要求　取样所采用的机械加工方法或热加工方法不得对试样性能产生影响。

（2）钢　厚度超过 8mm 时，不能采用剪切方法。当采用热切割或可能影响切割面性能的其他切割方法从焊件或试件上截取试样时，应确保所有切割面距离试样的表面至少 8mm 以上。平行于焊件或试件的原始表面的切割，不应采用热切割方法。

（3）其他金属材料　不得采用剪切方法和热切割方法，只能采用机械加工方法（如锯或铣、磨等）。

**5. 机械加工**

（1）位置　试样的厚度 $t_s$，一般应与焊接接头处母材的厚度相等，如图 2-53a 所示。当相关标准要求进行全厚度（厚度超过 30mm）试验时，可从接头截取若干个试样覆盖整个厚度，如图 2-53b 所示。在这种情况下，试样相对接头厚度的位置应作记录。

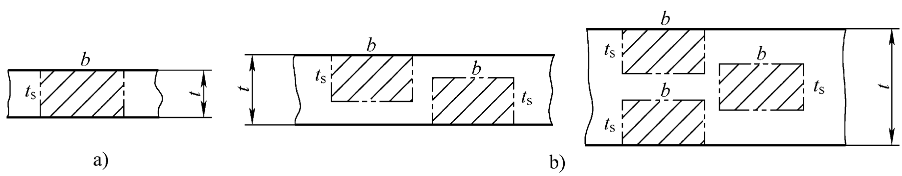



图 2-53　试样的位置示例

a）全厚度试验　b）多试样试验

$t$—焊接接头的厚度（mm）　$b$—平行长度部分宽度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）

注：试样可以相互搭接。

（2）尺寸　按下面要求：

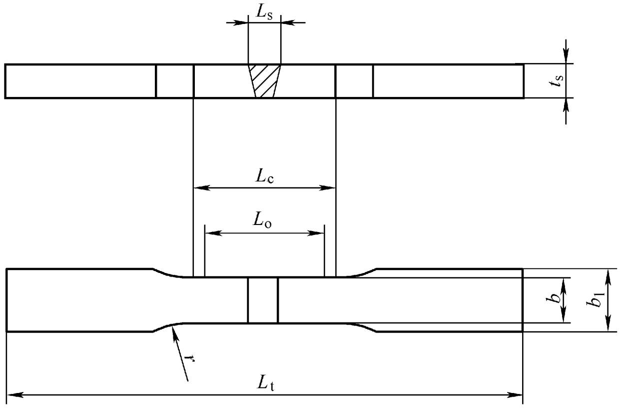
1）对于板及管板状试样，试样厚度沿着平行长度 $L_c$ 对于从管接头截取的试样应均衡一致，其形状和尺寸应符合表 2-36 及图 2-54 的规定。对于从管接头截取的试样，可能需要矫平夹持端；然而，这种变平及可能产生的厚度变化不应波及平行长度 $L_c$。

**表 2-36　板及管板状试样的尺寸**　　（单位：mm）

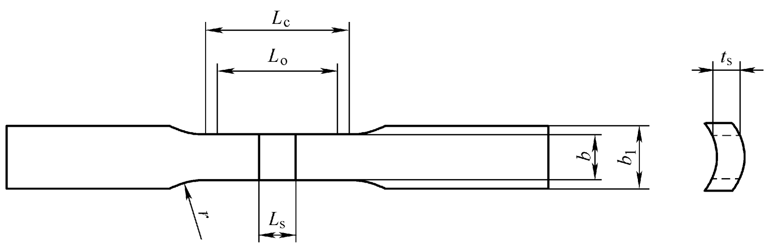
| 名　称 | | 符　号 | 尺　寸 |
|---|---|---|---|
| 试样总长度 | | $L_t$ | 适合于所使用的试验机 |
| 夹持端宽度 | | $b_1$ | $b+12$ |
| 平行长度部分宽度 | 板 | $b$ | $12(t_s\leqslant 2)$<br>$25(t_s>2)$ |
| | 管子 | $b$ | $6(D\leqslant 50)$<br>$12(50<D\leqslant 168)$<br>$25(D>168)$ |
| 平行长度 | | $L_c$ | $\geqslant L_s+60$ |
| 过渡弧半径 | | $r$ | $\geqslant 25$ |

注：1. 对于压焊及高能束焊接头而言，焊缝宽度为零（$L_s=0$）。

2. 对于某些金属材料（如铝、铜及其合金）可以要求 $L_c\geqslant L_s+100$mm。




a)




b)

图 2-54　板和管接头板状试样

a）板接头　b）管接头

$L_o$—原始标距（mm）

2）整管拉伸试样如图 2-55 所示。

3）实心截面试样尺寸应根据协议要求。当需要机加工成圆柱形试样时，试样尺寸应依据 GB/T 228.1 要求，只是平行长度 $L_c$ 应不小于 $L_o$ +60mm，如图 2-56 所示。

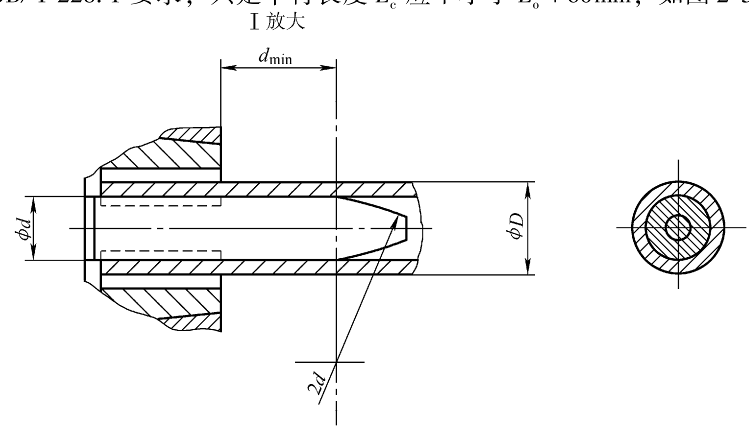



图 2-55　整管拉伸试样

$d$—管塞直径（mm）　$D$—管外径（mm）

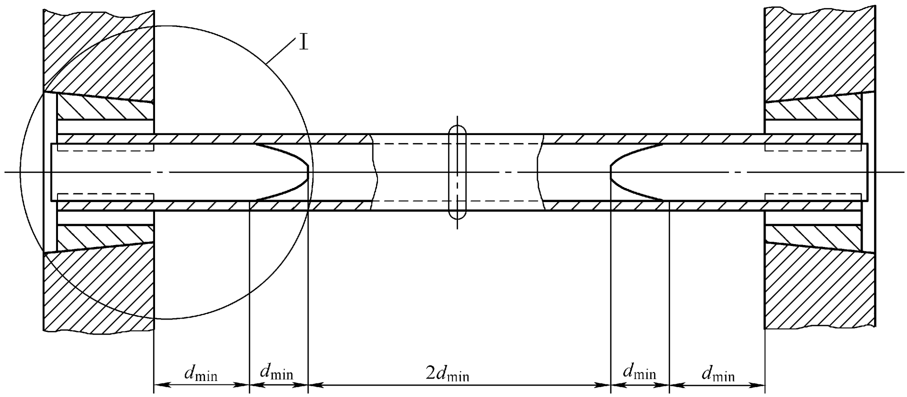



图 2-55　整管拉伸试样（续）

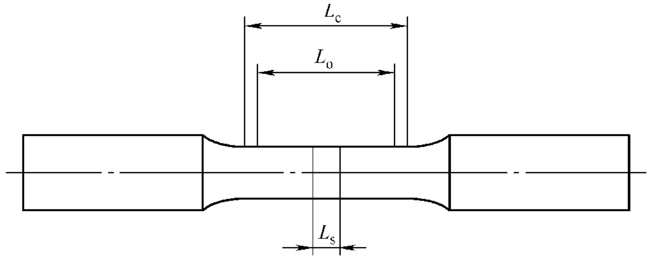



图 2-56　实心圆柱形试样

$L_s$—加工后焊缝的最大宽度（mm）

（3）表面制备　试样制备的最后阶段要进行机加工，应采取预防措施避免在表面产生变形硬化或过热。试样表面应没有垂直于试样平行长度 $L_c$ 方向的划痕或切痕，不得除去咬边。超出试样表面的焊缝金属应通过机加工除去，对于有熔透焊道的整管试样应保留管内焊缝。

## 2.8.2　试验设备

金属材料焊接接头拉伸试验所用设备及要求与室温拉伸试验完全相同。

## 2.8.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验开始前，应测量并记录试样尺寸。

2）依据 GB/T 228.1 规定对试样逐渐连续加载。

3）除非另有规定，试验一般应在23℃ ±5℃的温度条件下进行。

4）其他试验要求与室温拉伸试验相同。

**2. 焊接接头拉伸性能测定**

按金属材料室温拉伸试验方法进行，试验完后检查断裂面和记录缺欠情况（包括种类、尺寸、数量）。如果发现有白点，应记录其位置，白点的中心部位才可视为缺欠。在测试报告中应注明断裂的位置，并记录最大力和计算出的抗拉强度。

**3. 试验结果数值的修约**

试验测定的性能结果数值修约与室温拉伸试验完全相同。

## 2.9　金属材料焊缝十字接头和搭接接头拉伸试验

金属材料焊缝十字接头和搭接接头拉伸试验按照 GB/T 26957—2011《金属材料焊缝破坏性试验十字形接头和搭接接头拉伸试验方法》进行。

### 2.9.1　试样

**1. 一般要求**

1）试件的线性错边和角度偏差应保持最低，并记录在试验报告中。

2）焊缝轴线应保持与试样的纵向垂直。

3）每个试样应打标记以便识别其从试件的取样部位。相关标准有要求时，还应标出加工方向（例如轧制方向或挤压方向）。

4）焊件接头或试样一般不进行热处理，但相关标准规定或允许被试验的焊接接头进行热处理除外，这时应在试验报告中详细记录热处理的参数。对于会产生自然时效的铝合金，应记录焊接至开始试验的间隔时间。

5）取样所采用的机械加工方法或热加工方法不得对试样性能产生影响。

6）应采用锯或铣床加工。

7）如果采用可能影响切割面的热切割（或其他切割）方法将试样从试件中切取，切口应距离试样边缘至少8mm。

8）试样制备的最后阶段应采用机械加工，应采取预防措施避免在表面产生形变硬化或过热。试样的受试表面应当无横向划痕或缺口，不得除去咬边，除非相关标准另有要求。

**2. 十字接头试样**

1）十字接头试样应按图2-57的规定焊接并制备。

2）十字接头试样的尺寸应符合图2-58的规定。

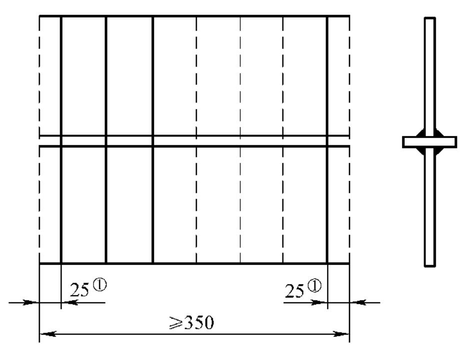



图2-57　十字接头的取样部位

①舍弃。

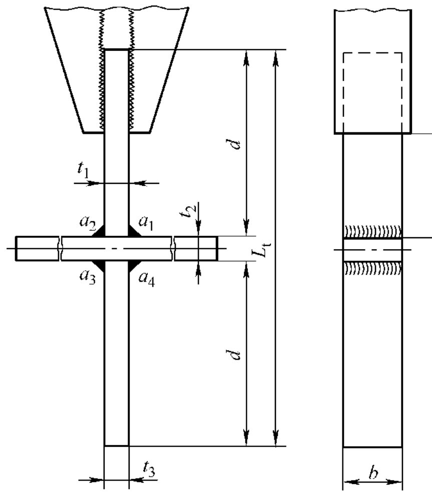



图 2-58　十字接头试样的尺寸

注：1. 对生产试验，$t$ 为产品厚度；对工艺试验，$t_1=t_2=t_3$，$t_1$、$t_2$、$t_3$ 指用于制备试件和试样的材料厚度。

2. $d$ 为试板长度，$c$ 为试验机夹头之间受试部分的自由长度。$d \geqslant 150$；$30 \leqslant b \leqslant 50$；$3t \leqslant b \leqslant 50$；$c \geqslant 2b$；$L_t=2d+t_2$，$L_t$为试样的总长度。

3. $a$（角焊缝的有效厚度）对工艺试验，按照应用标准要求。如果应用标准未作规定则：$a \approx 0.5t$；$a_1 \approx a_2 \approx a_3 \approx a_4$；$a$ 对生产试验，按照供货要求。

**3. 搭接接头试样**

1）搭接接头试件应按图 2-59 的规定焊接并制备。

2）搭接接头试样的尺寸应符合图 2-60 的规定。

## 2.9.2　试验设备

金属材料焊缝十字接头和搭接接头拉伸试验所用设备及要求与室温拉伸试验完全相同。

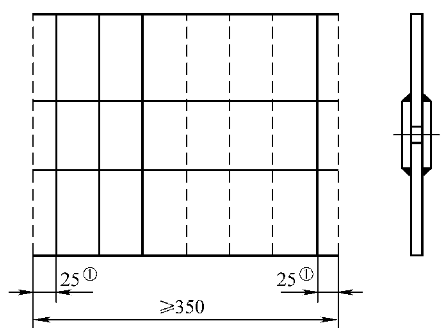



图 2-59　搭接接头的取样部位
①舍弃。

## 2.9.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验开始前，应测量并记录试样尺寸。

2）沿焊缝轴线垂直方向对试样连续施加拉伸力直至其破断，加力速度应保持均匀，不得有突变。

3）除非另有规定，试验一般应在 23℃ ±5℃的温度条件下进行。

4）其他试验要求与室温拉伸试验相同。

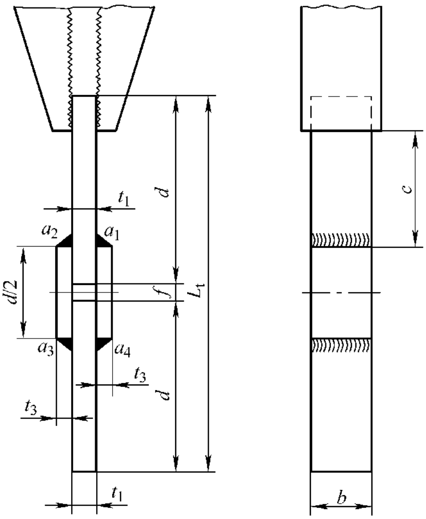



图 2-60　搭接接头试样的尺寸

注：1. 对生产试验，$t$ 为产品厚度；对工艺试验，$t_1=t_3$，$t_1$、$t_3$ 指用于制备试件和试样的材料厚度。

2. $d$ 为试板长度，$c$ 为试验机夹头之间受试部分的自由长度。$d \geqslant 150$；$30 \leqslant b \leqslant 50$；$3t \leqslant b \leqslant 50$；$c \geqslant 2b$；$L_t=2d+f$，$L_t$为试样的总长度，$f$ 为搭接试样之间的间隙。

3. $a$（角焊缝的有效厚度）对工艺试验，按照应用标准要求。如果应用标准未作规定则：$a \approx 0.5t$；$a_1 \approx a_2 \approx a_3 \approx a_4$；$a$ 对生产试验，按照供货要求。

**2. 焊缝十字接头和搭接接头拉伸性能测定**

按金属材料室温拉伸试验方法进行，试验完后检查断裂面和记录缺欠情况（包括种类、尺寸、数量）。如果发现有白点，应记录其位置，白点的中心部位才可视为缺欠。若试板分层，则试验结果无效。

应在若干个点测量断裂面宽度，每个测量点之间的距离为 $3a$（角焊缝的有效厚度，见图 2-58 和图 2-59），求出断裂面宽度平均值 $w_f$（见图 2-61）。

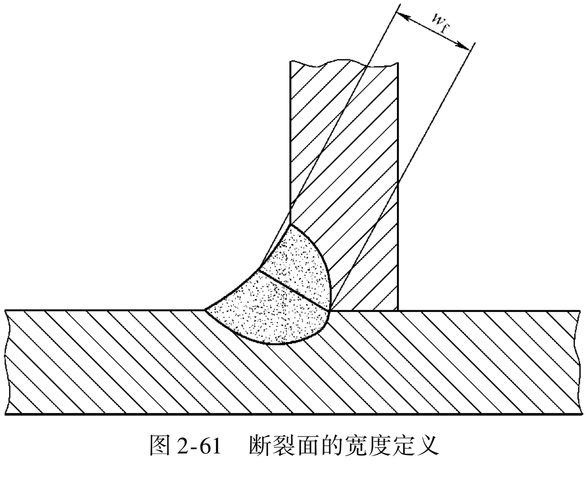



图 2-61　断裂面的宽度定义

按下式求出断裂面积 $A_f$：

$$A_f = w_f b$$

式中　$A_f$——断裂面积，单位为 $mm^2$；

$w_f$——断裂面宽度平均值（见图 2-61），单位为 mm；

$b$——试样宽度（与断裂面长度相等，见图 2-58 和图 2-60），单位为 mm。

按下式求出抗拉强度 $R_m$：

$$R_m = F_m / A_f$$

式中　$R_m$——抗拉强度，单位为 MPa；

$F_m$——试验过程中试样承受的最大力，单位为 N；

$A_f$——断裂面积，单位为 $mm^2$。

## 2.10　焊缝及熔敷金属拉伸试验

焊缝及熔敷金属拉伸试验按照 GB/T 2652—2008《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》进行。该试验方法适用于金属材料熔焊焊缝及熔敷金属的拉伸试验。

### 2.10.1　试样

**1. 取样位置**

试样应从试件的焊缝及熔敷金属上纵向截取。加工完成后，试样的平行长度应全部由焊缝金属组成，如图 2-62 和图 2-63 所示。为了确保试样在接头中的正确定位，试样两端的接头横截面可作宏观腐蚀。

**2. 标记**

1）每个试件都应做标记，以识别其在接头中的准确位置。

2）每个试样都应做标记，以识别其在试件中的准确位置。

**3. 热处理及/或时效**

焊接接头或试样一般不进行热处理，但相关标准规定或允许被试验的焊接接头进行热处理除外，这时应在试验报告中详细记录热处理的参数。对于会产生自然时效的铝合金，应记录焊接至开始试验的间隔时间。

钢铁类焊缝金属中有氢存在时，可能会对试验结果带来显著影响，需要采取适当的去氢处理。

**4. 取样**

（1）一般要求　取样所采用的机械加工方法或热加工方法不得对试样性能产生影响。

（2）钢　厚度超过 8mm 时，不能采用剪切方法。当采用热切割或可能影响切割面性能的其他切割方法从焊件或

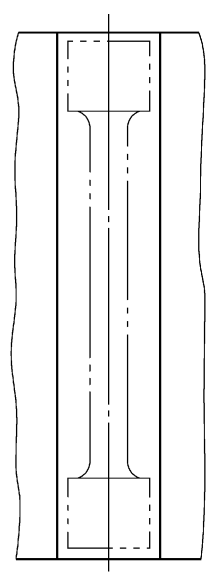


图 2-62　试样的位置示例（纵向截面）

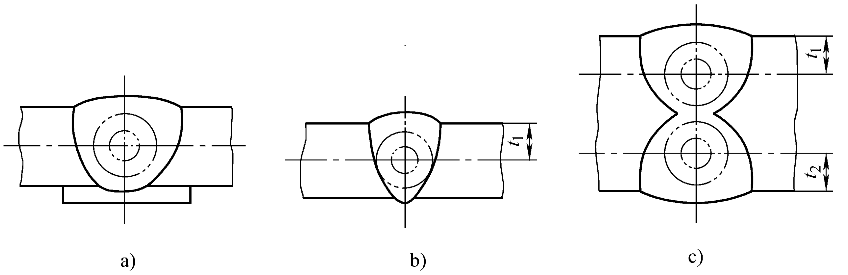



图 2-63　试样的位置示例（横向截面）

a）用于焊接材料分类的熔敷金属试样　b）取自单面焊接头的试样　c）取自双面焊接头的试样

$t_1$、$t_2$—试样中心距表面的距离（mm）

试件上截取试样时，应确保所有切割面距离试样的表面至少 8mm 以上。平行于焊件或试件的原始表面的切割，不应采用热切割方法。

（3）其他金属材料　不得采用剪切方法和热切割方法，只能采用机械加工方法（如锯或铣、磨等）。

**5. 机械加工**

（1）位置　除非另有规定，试样应取自焊缝金属的中心，如图 2-62 所示。其横截面位置按照图 2-63 的规定。未能在中间厚度位置截取试样时，应记录其中心距表面的距离 $t_1$，如图 2-63b 所示。在厚板或双面焊接头情况下，可以在厚度方向不同位置截取若干试样，如图 2-63c 所示，应记录每个试样中心距表面的距离 $t_1$ 和 $t_2$。

（2）尺寸　尺寸要求如下：

1）每个试样应具有圆形横截面，而且平行长度范围内的直径 $d$ 应符合 GB/T 228.1 的规定。

2）试样的公称直径 $d$ 应为 10mm。如果无法满足这一要求，直径应尽可能大，且不得小于 4mm。试验报告应记录实际的尺寸。

3）试样的夹持端应满足所使用的拉伸试验机的要求。

**6. 表面质量**

试样表面应避免产生变形硬化或过热。

## 2.10.2　试验设备

金属材料焊缝及熔敷金属拉伸试验所用设备及要求与室温拉伸试验完全相同。

## 2.10.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验开始前，应测量并记录试样尺寸。

2）依据 GB/T 228.1 规定对试样逐渐连续加载。

3）除非另有规定，试验一般应在 23℃ ±5℃的温度条件下进行。

4）其他试验要求与室温拉伸试验相同。

**2. 焊缝及熔敷金属拉伸性能测定**

按金属材料室温拉伸试验方法进行，试验完后检查断裂面和记录缺欠情况（包括种类、尺寸、数量）。如果发现有白点，应记录其位置，白点的中心部位才可视为缺欠。在测试报告中应注明断裂的位置，并记录最大力和计算出的抗拉强度 $R_m$、规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$、断后伸长率 $A$、断面收缩率 $Z$。

## 2.11　金属材料管和环拉伸试验

金属材料管和环拉伸试验按照 GB/T 25048—2010《金属材料　管　环拉伸试验方法》进行。

### 2.11.1　试样

1）试样应当是从原金属管上截取的一段管环，且其两个端面垂直于金属管的轴线，金属管的外径大于 150mm，管壁厚不大于 40mm 且内径大于 100mm。

2）试样的长度（管环的宽度）应为 15mm 左右。如果金属管壁厚大于 15mm，此时试样长度可等于管壁厚度。

3）管环试样的端面应无毛刺，试样的棱边允许用锉或者其他方法使其倒圆或倒角。如果试验结果满足试验要求，可不对其进行倒圆或倒角。

### 2.11.2　试验设备

试验设备是两根直径相同且轴线平行的圆柱销，它们可相对移动，并在移动过程中仍保持平行，如图 2-64 所示。

原则上，圆柱销的直径选择应保证其能达到试验所需的最低强度要求，在金属管环试样内径允许的情况下，圆柱销的直径应至少为管环壁厚的 3 倍。

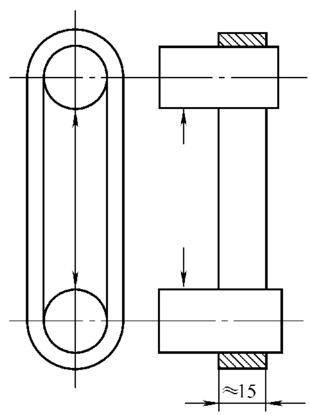



图 2-64　试验装置示意图

### 2.11.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在 10～35℃的温度条件下进行。

2）对要求在控制条件下进行的试验，温度应控制在 23℃ ±5℃。

3）在有争议的情况下，试验速度不得超过 5mm/s。

**2. 试验方法**

将金属管上切割下来的管环试样放在两根圆柱销上，通过两根圆柱销一定速度的相对移动使管环发生变形直至断裂，观察试样内部缺陷。

## 2.12　非铁金属细丝拉伸试验

非铁金属细丝拉伸试验按照 GB/T 10573—1989《有色金属细丝拉伸试验方法》进行。该试验适用于测定标称直径不大于 0.25mm 的非铁金属丝材的常温拉伸性能。

### 2.12.1　试样

1）试样应从外观检查合格的产品中抽取。

2）试样原始标距长度一般为 100mm，另有要求也可选用 200mm 或 50mm。在不需要测定伸长率时，试样标距可采用 50mm。

3）试样截取的总长度应根据试样原始标距和夹持长度确定。

4）试样应距丝材端头 300mm 以外截取，每个试样间距不小于 300mm。对于直径大于 0.1mm 的贵金属丝材，取样间距可适当缩小。

5）试样在承受拉伸前不得有机械损伤和弯折。

6）每轴丝材取 3 个试样。

### 2.12.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机测量误差符合 JJG 157 中有关规定。试验机的精度应满足 1 级要求。

2）试验机应计量部门定期检定，试验所用力值范围应在被检范围以内。

**2. 量具**

1）激光测径仪、光学测微仪、杠杆千分尺及外径千分尺，其最小分度值应满足表 2-37的有关规定。

**表 2-37　量具的最小分度值**

| 丝材标称直径/mm | 量具名称及方法 | 量具最小分度值/mm |
|---|---|---|
| 0.005～0.05 | 参照 GB/T 15077 | 截面误差≤1% |
| | 激光测径仪 | 0.0001 |
| >0.05～0.1 | 光学测微仪 | 0.001 |
| >0.1～0.25 | 外径千分尺、杠杆千分尺 | 0.001 |

2）所用量具应由计量部门定期检定。

### 2.12.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验环境温度为 10～35℃。

2）试验机两夹头间距为 $L_o \pm 0.5$mm（$L_o$ 是试样原始标距，单位 mm）。

3）装夹试样时要保持试样自由下垂且平直，必要时对试样施加预张力，其大小一般不超过丝材最大力的 5%。也可以把被测试样粘在纸框两端的直线上，粘结长度 $h$ 及纸框宽度 $b$ 视夹头大小确定，如图 2-65 所示，待试样装好后将纸框剪断。

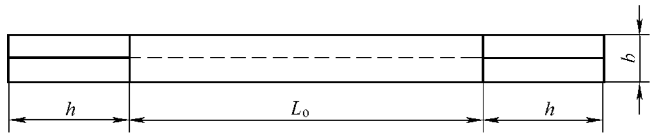



图 2-65　粘结试样

$L_o$—试样原始标距（mm）　h—粘结长度（mm）　b—纸框宽度（mm）

4）拉伸时夹头移动速度按表 2-38 规定进行。

**表 2-38　拉伸时夹头移动速度**

| 断时总伸长率 $A_t$（%） | 夹头移动速度/（mm/min） |
|---|---|
| ≤10 | <10 |
| >10～20 | <20 |
| >20～50 | <50 |

在只需测定最大力的情况下，夹头移动速度可根据被测丝材的预测伸长率参照表 2-38进行。仲裁试验时夹头移动速度为 5mm/min。

5）试样应从被测丝材上抽取至少 1m 长的丝头，沿丝材长度方向在相互垂直的部位间隔测量 6～10 点，取其算术平均值，即为被测丝材试样的直径。

6）试样的横截面积按下式计算：

$$S_o = 0.7854 d_o^2$$

式中　$S_o$——横截面积，单位为 $mm^2$；

　　$d_o$——丝材直径，单位为 mm。

**2. 金属细丝拉伸性能测定**

断裂总延伸率 $A_t$、断后伸长率 $A$、规定塑性延伸强度 $R_p$、规定总延伸强度 $R_t$、抗拉强度 $R_m$ 的测定方法均与室温拉伸试验时相同。

## 2.13　金属材料薄板和薄带拉伸应变硬化指数的测定

金属材料薄板和薄带拉伸应变硬化指数的测定按照 GB/T 5028—2008《金属材料　薄板和薄带　拉伸应变硬化指数（n 值）的测定》进行。

该试验适用于塑性变形范围内应力-应变曲线呈单调连续上升的部分。拉伸应变硬化指数（n 值）定义为：在单轴拉伸应力作用下，真实应力与真实塑性应变数学方程式中的真实塑性应变指数。此方程可用下式表示：

$$s = Ce^n$$

式中　$s$——真实应力，单位为 MPa；

　　$C$——强度系数，单位为 MPa；

　　$e$——真实塑性应变；

　　$n$——拉伸应变硬化指数。

## 2.13.1　试样

1）应按照相关产品标准要求取样，如果产品标准没有规定，则按照有关各方的协议取样。试样尺寸公差、几何公差及标记等应符合 GB/T 228.1 的规定。

2）若在测定拉伸应变硬化指数（$n$ 值）的同时还需测定塑性应变比（$r$ 值），则试样还应符合 GB/T 5027 的要求。

3）除非另有规定，试样厚度应是产品的原始厚度。

4）试样表面不得有划伤等缺陷。

## 2.13.2　试验设备

1）拉伸试验机应满足 GB/T 16825.1 中的 1 级或优于 1 级的要求。试样的夹持方式应符合 GB/T 228.1 的规定。

2）测量标距变化的引伸计的准确度应满足 GB/T 12160 标准中的 2 级或优于 2 级的要求（如果同时根据 GB/T 5027 测定材料的 $r$ 值时，须采用 1 级引伸计）。

3）当测量试样平行长度部分的厚度和宽度时，尺寸测量装置的分辨力应符合 GB/T 228.1 的规定。

## 2.13.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在 10～35℃的温度条件下进行。

2）对要求在控制条件下进行的试验，温度应控制在 23℃ ±5℃。

3）除非另有标准规定，在塑性变形阶段，试样平行长度部分的应变速率不得超过 0.008/s。在测定 $n$ 值的整个应变区间内，该速率应保持恒定。

4）若在测定拉伸应变硬化指数（$n$ 值）的同时还需测定规定塑性延伸强度、屈服强度等性能时，试验速率还应满足 GB/T 228.1 中的相关规定。

**2. 拉伸应变硬化指数的测定**

（1）测量　当在整个均匀塑性应变范围内测定 $n$ 值时，测量应变的上限应稍小于最大力所对应的塑性应变。当材料呈现单调上升的均匀变形行为（即材料无明显上、下屈服）时，测量应变的下限应稍大于测定 $R_m$ 的试验速率切换点对应的应变量，如图 2-66 所示。当材料呈现明显屈服（即材料有上、下屈服强度）时，测量应变的下

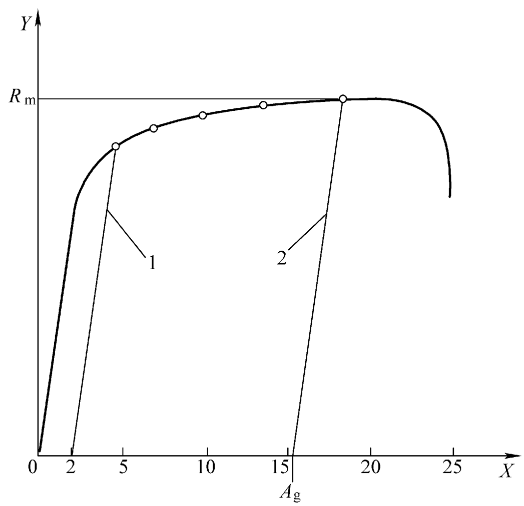



图 2-66　$n_{2\text{-}20/A_g}$或 $n_{2\text{-}A_g}$应变取值范围

$X$—应变（%）　$Y$—应力（MPa）　1—下限　2—上限

$A_g$—最大塑性延伸率（%）　$R_m$—抗拉强度（MPa）

限应稍大于加工硬化起始点和测定 $R_m$ 的试验速率切换点对应的应变量，如图 2-67 和图 2-68 所示。

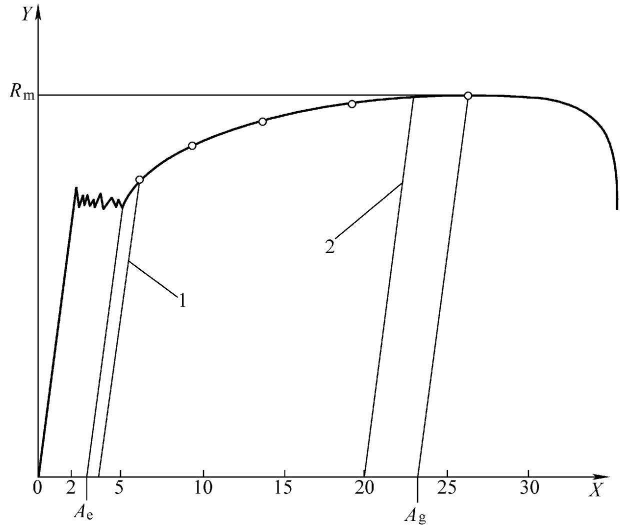



图 2-67　$n_{4\text{-}20/Ag}$或 $n_{4\text{-}20}$应变取值范围

X—应变（%）　Y—应力（MPa）　1—下限　2—上限

$A_e$—屈服点延伸率（%）　$A_g$—最大塑性延伸率（%）　$R_m$—抗拉强度（MPa）

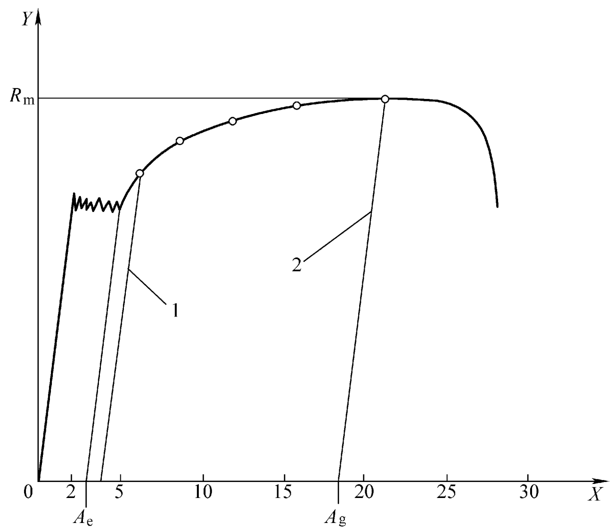



图 2-68　$n_{4\text{-}20/Ag}$或 $n_{4\text{-}Ag}$应变取值范围

X—应变（%）　Y—应力（MPa）　1—下限　2—上限

$A_e$—屈服点延伸率（%）　$A_g$—最大塑性延伸率（%）　$R_m$—抗拉强度（MPa）

（2）真实应力 $s$ 和真实塑性应变 $e$　根据试验力和相应的变形值，采用下式计算真实应力 $s$：

$$s = \frac{F}{S_o} \times \frac{L_e \Delta L}{L_e}$$

式中　$F$——施加于试样上的瞬时瞬时力，单位为 N；

$S_o$——试样平行长度的原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$L_e$——引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta L$——引伸计标距的瞬时延伸，单位为 mm。

采用下式计算真实塑性应变 $e$：

$$e = \ln\left(\frac{L_e + \Delta L}{L_e} - \frac{F}{S_o m_E}\right)$$

式中　$m_E$——应力-应变曲线弹性部分的斜率，单位为 MPa。

采用下式计算拉伸应变硬化指数 $n$：

$$s = Ce^n$$

式中　$C$——强度系数，单位为 MPa。

**3. 试验结果数值的修约**

拉伸应变硬化指数（$n$ 值）应按 GB/T 8170 的规定修约到 0.01。

## 2.14　金属材料弹性模量和泊松比测定试验

金属材料弹性模量和泊松比测定试验按照 GB/T 22315—2008《金属材料　弹性模量和泊松比试验方法》进行。

### 2.14.1　静态法

**1. 样坯的切取与试样制备**

1）样坯切取的部位、方向和数量应按有关标准或协议的规定。如无特殊规定，应按照 GB/T 2975 的要求进行。

2）切取样坯和机加工试样时，应防止因冷加工或受热而影响金属的力学性能。如果由于试样制备的需要而将材料展平时，必须在试验结果中注明采用了后续消除残余应力的热处理过程。

注：该试验方法的目的是为了揭示材料固有的性质，因此试样不应存在残余应力，材料需要在 $T_m/3$ 的温度退火处理 30min 以消除应力（$T_m$ 是材料的热力学熔点温度），这个过程需要在报告部分注明。如果试验目的是为了检验产品性能，则热处理过程可以省略。试验报告中应记录测试材料的状况，包括热处理工艺。

3）完成最后机加工的试样，应平直、无毛刺、表面无划伤及其他人为或机械损伤。

4）从带卷切取的薄板试样，允许带有不影响性能测定的轻度弯曲。

**2. 试样形状和尺寸**

1）圆形和矩形拉伸试样按 GB/T 228.1 的规定，试样夹持端与平行段间的过渡部分半径应尽量大，试样平行长度应至少超过标距长度加上两倍的试样直径或宽度。

2）圆形和矩形压缩试样按 GB/T 7314 的规定，试样端部要平整、平行，并垂直于侧面。

3）通过协商可以采用其他类型的试样。

4）试样头部形状和尺寸应适合于试验机夹头的夹持。

5）头部带承载销孔的矩形拉伸试样，销孔应表面光滑，销孔中心与标距部分的宽度的中心线偏离应不大于标距部分宽度的 0.005 倍。

6）两面和四面机加工的矩形试样，其机加工面的表面粗糙度 $Ra$ 应不大于 1.6μm。若采用两面机加工的矩形试样，其未加工面的尺寸公差和几何公差也应符合加工面的公差要求。

7）对于板材的矩形试样，可在试样宽度两侧制备小凸耳供装夹引伸计用。带凸耳的矩形试样见 GB/T 7314。

**3. 试验机**

试验机应按 GB/T 16825.1 进行检验，其准确度应为 1 级或优于 1 级。

压缩试验用的试验机，除了要满足准确度要求外，其他辅助装置，例如力导向装置、调平垫块和约束装置等的要求，应符合 GB/T 7314 的规定。

**4. 引伸计**

引伸计应按 GB/T 12160 进行检验，其准确度应为 0.5 级或优于 0.5 级。

**5. 试样尺寸的测量**

测量试样原始横截面尺寸的量具应满足 GB/T 228.1 的要求。

1）圆形试样应在标距两端及中间处相互垂直的方向上测量直径，各取其算术平均值，按下式计算横截面积。将 3 处测得横截面积的算术平均值作为试样原始横截面积并至少保留 4 位有效数字。

$$S_o = \frac{1}{4}\pi d_o^2$$

式中　$S_o$——试样平行长度部分的原始横截面积，单位为 mm²；

$d_o$——圆形试样平行长度部分的原始直径，单位为 mm。

2）矩形试样应在标距两端及中间处测量厚度和宽度，按下式计算横截面积。将 3 处测得横截面积的算术平均值作为试样原始横截面积并至少保留 4 位有效数字。

$$S_o = a_o b_o$$

式中　$S_o$——试样平行长度部分的原始横截面积，单位为 mm²；

$a_o$——矩形试样原始厚度，单位为 mm；

$b_o$——矩形试样平行长度部分的原始宽度，单位为 mm。

注：带凸耳的试样不应在靠近凸耳根部处测量其宽度。

**6. 初试验力**

对于大多数试验机和试样，由于间隙、试样弧度和原始夹头对中等的影响，当对试样施加很小的试验力时会对引伸计的输出量产生较大的偏差。试验时须对试样施加能够消除这些影响的初试验力，测量应从初试验力开始，到弹性范围内的更大的试验力为止。

**7. 试验速度**

为了避免发生绝热膨胀或绝热收缩的影响，并能够准确测定轴向力和相应的变形，

试验速度不应过高，但为了避免蠕变影响，速度也不应太低。对于拉伸试验，弹性应力增加速率应符合 GB/T 228.1 的规定，推荐取下限；对于压缩试验，弹性应力增加速率应符合 GB/T 7314 的规定，推荐取下限。速度应尽可能保持恒定。

**8. 力的同轴度**

试验机夹持装置应能使试样承受轴向力，在初轴向力与终轴向力之间，在各个方向上在试样相对两侧测定的应变变化量与其平均值之差的最大值（即最大弯曲应变）不超过平均值的 3%。

压缩试验应使用 GB/T 7314 中规定的调平台和力的导向装置以及约束装置。

**9. 引伸计的使用**

（1）轴向引伸计　测量试样轴向变形时，使用能测量试样相对两侧平均变形的轴向均值引伸计，或在试样相对两侧分别固定两个轴向引伸计。测量模量的准确度取决于测量应变的精度。增加标距长度可以提高测量应变的精度，但前提是必须保证加工试样平行段的公差要求。

使用带凸耳的矩形试样，引伸计装夹于同侧两凸耳的外侧或内侧。其引伸计标距应为两凸耳宽度中心线之间的距离。

（2）横向引伸计　测量试样横向变形时，横向引伸计应装卡在试样标距范围内的直径（宽度）上。以此处的直径（或宽度）尺寸作为横向引伸计标距。

**10. 试验温度**

试验应在 10～35℃下进行，整个试验过程中的环境温度波动应小于 ±2℃。

**11. 杨氏模量的测定**

（1）图解法　试验时，用自动记录方法绘制轴向力-轴向变形曲线，如图 2-69 所示。在记录的轴向力-轴向变形曲线上，确定弹性直线段，在该直线段上读取相距尽量远的 $A$、$B$ 两点之间的轴向力变化量和相应的轴向变形变化量，按下计算杨氏模量：

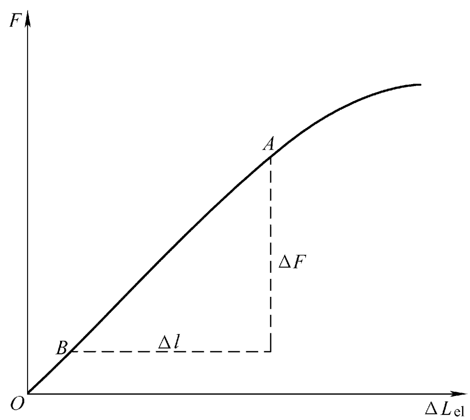



图 2-69　图解法测定杨氏模量

$$E=\left(\frac{\Delta F}{S_o}\right)\Big/\left(\frac{\Delta l}{L_{el}}\right)$$

式中　$E$——杨氏模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——$A$、$B$ 两点的力值增量，单位为 N；

$S_o$——试样平行长度部分的原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$\Delta l$——轴向变形变化量，单位为 mm；

$L_{el}$——轴向引伸计标距，单位为 mm。

（2）拟合法　试验时，在弹性范围内记录轴向力和与其相应的轴向变形的一组数字数据对。数据对的数目一般不少于 8 对。用最小二乘法将数据对拟合轴向应力-轴向应变直线，拟合直线的斜率即为杨氏模量，按下式计算：

$$E = [\sum(e_1 S) - k\overline{e_1}\,\overline{S}]/(\sum e_1^2 - k\overline{e_1}^2)$$

$$e_1 = \frac{\Delta L_{el}}{L_{el}}$$

$$\overline{e_1} = \frac{\sum e_1}{k}$$

$$S = \frac{F}{S_o}$$

$$\overline{S} = \frac{\sum S}{k}$$

式中　$E$——杨氏模量，单位为 MPa；

$k$——数据对数目；

$e_1$——轴向应变（%）；

$\overline{e_1}$——轴向应变的平均值（%）；

$S$——轴向应力，单位为 MPa；

$\overline{S}$——轴向应力的平均值，单位为 MPa；

$S_o$——试样平行长度部分的原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$L_{el}$——轴向引伸计标距，单位为 mm。

$\Delta L_{el}$——试样轴向变形，单位为 mm。

$F$——轴向力，单位为 N。

注：当模量是在应变超过 0.25% 之后得到的，建议采用瞬时截面积和瞬时标距长度代替原始截面积和原始标距长度来计算应力与应变。

（3）电阻应变计测定杨氏模量　按下面方法进行：

1）外观检查应变计，应该丝栅不乱，无氧化，引线牢固。一般采用 0.1Ω 精度电桥测量每个应变计阻值，检查电阻有无变值或出现飘移等现象，每片之间的阻值偏差最好不超过 ±0.1Ω。

2）试样贴片处应进行必要的机械打磨，表面粗糙度 $Ra$ 应为 1.6～2.5μm。用划针在测点处划出贴片定位线，用浸有丙酮或无水乙醇脱脂棉球将贴片位置及周围擦洗干净，直至棉球洁白为止。

3）在应变计基底面和贴片处涂抹一层薄薄的粘结胶，然后把应变计对准试样的贴片标记处，用一小片塑料（如聚四氟乙烯）薄膜盖在应变计上，再用大拇指欺压，从应变计一端开始作无滑动的滚动，将应变计下的多余胶水或气泡排除。

4）在拉、压试样轴线两侧对称位置各贴一电阻应变计，应变片轴线应与试样轴线平行或垂直。

5）已安装完毕的电阻应变计，应进行应变计质量检查，检查是否有断丝现象，阻值是否与原来相同，绝缘电阻是否满足测量要求。

6）测量导线与应变计引出线连接的焊点要小而牢固，并保证焊点与被测表面的良好绝缘和固定。

7）电阻应变计与应变仪的桥路连接通常采用半桥（见图 2-70a）或全桥（见图 2-70b）方式连接。

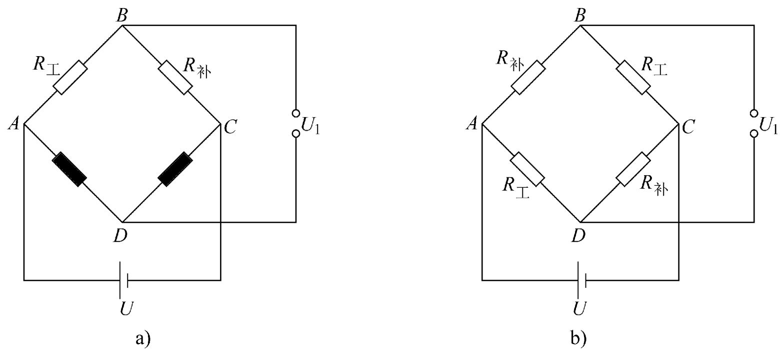



图 2-70　电阻应变计与应变仪的桥路连接

a）半桥接法　b）全桥接法

半桥接法是将试样两侧各粘贴的沿轴向两电阻应变计（简称工作片）的两端分别接在应变仪的 $A$、$B$ 接线端上，温度补偿片接到应变仪的 $B$、$C$ 接线端上。当试样轴向受力时，电阻应变仪即可测得对应试验力下的轴向应变 $e_1$。全桥接法是把两片轴向的工作片和两片温度补偿片接入应变仪的 $A$、$B$、$C$、$D$ 接线端中。当试样轴向受力时，电阻应变仪即可测得对应试验力下的轴向应变 $e_1$，因为应变仪显示的应变是两片应变计的应变之和，所以试样轴向应变应为应变仪所显示值的一半。

8）杨氏模量按下式计算：

$$E = \left(\frac{\Delta F}{S_o}\right) \Big/ \Delta e_1$$

式中　$E$——杨氏模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——轴向力变化量，单位为 N；

$S_o$——原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$\Delta e_1$——轴向应变变化量（%）。

**12. 弦线模量的测定**

（1）图解法　试验时，用自动记录方法绘制轴向力-轴向变形曲线，如图 2-71 所示。在记录的轴向力-轴向变形曲线上，通过与所规定的上、下两应力点（例如规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 的 10% 和 50% 两应力点）或两应变点相对应的 $A$、$B$ 两点画弦线。在所画出的弦线上读取轴向力变化量和相应的轴向变形变化量，按下式计算弦线模量：

$$E_{ch} = \left(\frac{\Delta F}{S_o}\right) \Big/ \left(\frac{\Delta l}{L_{el}}\right)$$

式中　$E_{ch}$——弦线模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——$A$、$B$ 间的力值增量，单位为 N；

$S_o$——试样平行长度部分的原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$\Delta l$——轴向变形变化量，单位为 mm；

$L_{el}$——轴向引伸计标距，单位为 mm。

（2）拟合法　试验时，在弹性范围内记录轴向力和相应的轴向变形的一组数字数据对。将该组数据对拟合一数学表达式（例如多项式），得到拟合的轴向应力-轴向应变曲线。在拟合的轴向应力-轴向应变曲线的弹性范围内，计算两规定应力或应变值之间所对应弦线的斜率，即为弦线模量。对于非线弹性金属材料，有关标准或协议在规定弦线模量时，应说明确定弦线的上、下两点的应力或应变值。

**13. 切线模量的测定**

（1）图解法　试验时，用自动记录方法绘制轴向力-轴向变形曲线，如图 2-72 所示。在记录的轴向力-轴向变形曲线上，通过规定应力或应变值对应的 $R$ 点做曲线的切线。在所画出的切线上读取相距尽量远的 $A$、$B$ 两点之间的轴向力增量和相应的轴向变形增量，按下式计算切线模量。

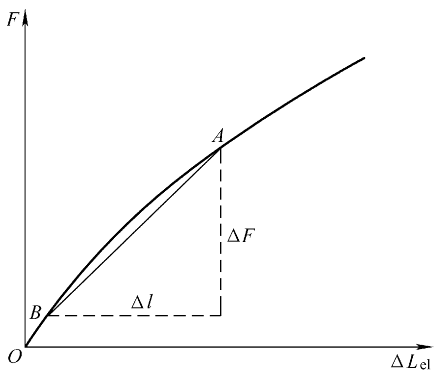



图 2-71　图解法测定弦线模量

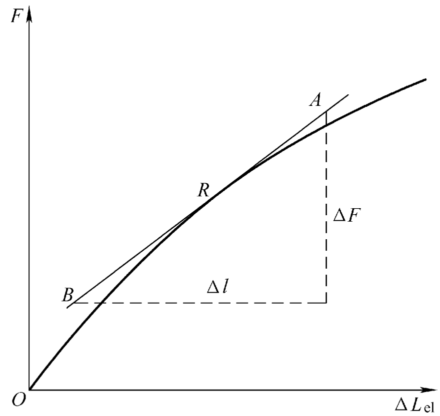



图 2-72　图解法测定切线模量

$$E_{tan}=\left(\frac{\Delta F}{S_o}\right)\bigg/\left(\frac{\Delta l}{L_{el}}\right)$$

式中　$E_{tan}$——切线模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——$A$、$B$ 间的力值增量，单位为 N；

$S_o$——试样平行长度部分的原始横截面积，单位为 $mm^2$；

$\Delta l$——轴向变形变化量，单位为 mm；

$L_{el}$——轴向引伸计标距，单位为 mm。

（2）拟合法　试验时，在弹性范围内记录轴向力和相应的轴向变形的一组数字数据对，将该组数据对拟合一数学表达式（例如多项式），得到拟合的轴向应力-轴向应变曲线。在拟合的轴向应力-轴向应变曲线的弹性范围内，计算曲线在规定应力或应变值处的斜率，即为切线模量。对于非线弹性金属材料，有关标准或协议在规定切线模量时，应说明切点的应力或应变值。

**14. 泊松比的测定**

（1）图解法　试验时，用双引伸计同时自动记录方法绘制横向变形-轴向变形曲线，如图 2-73a 所示。在记录的横向变形-轴向变形曲线上，确定弹性直线段，在直线段上读取相距尽量远的 $C$、$D$ 两点之间的横向变形增量和相应的轴向变形增量，按下式

计算泊松比。

$$\mu = \left(\frac{\Delta t}{L_{et}}\right) \bigg/ \left(\frac{\Delta l}{L_{el}}\right)$$

式中　$\mu$——泊松比；

$\Delta t$——横向变形变化量，单位为 mm；

$L_{et}$——横向引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta l$——轴向变形变化量，单位为 mm；

$L_{el}$——轴向引伸计标距，单位为 mm。

当在同一试验中，泊松比与杨氏模量一起进行测定时，推荐同时绘制轴向力-轴向变形曲线和横向变形-轴向变形曲线，如图 2-73b 所示。

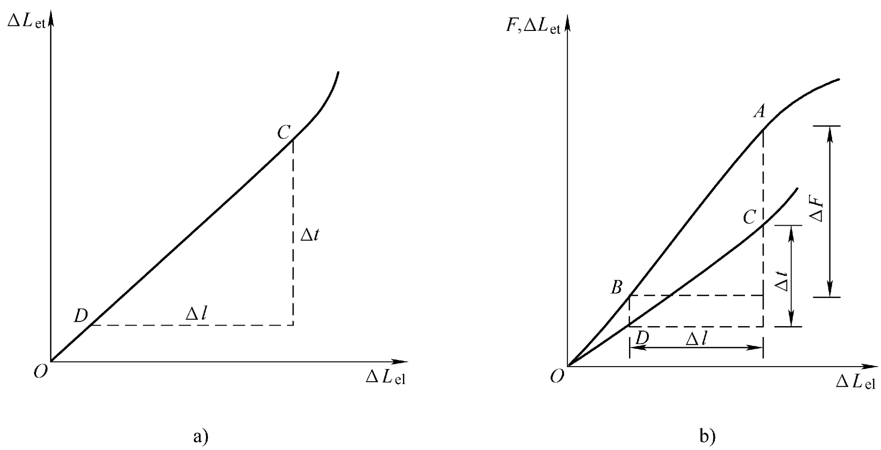



图 2-73　图解法测定泊松比

a）测定泊松比　b）测定杨氏模量与泊松比

（2）拟合法　试验时，在弹性范围内，在同一轴向力下记录横向变形和轴向变形的一组数字数据对。数据对的数目一般不小于 8 对。用最小二乘法将该组数据对拟合横向应变-轴向应变直线，直线的斜率即为泊松比，按下式计算：

$$\mu = \left[\sum (e_l e_t) - k\overline{e_l}\,\overline{e_t}\right] \Big/ \left(\sum e_l^2 - k\,\overline{e_1}^2\right)$$

$$e_l = \frac{\Delta L_{el}}{L_{el}}$$

$$\overline{e_l} = \frac{\sum e_l}{k}$$

$$e_t = \frac{\Delta L_{et}}{L_{et}}$$

$$\overline{e_t} = \frac{\sum e_t}{k}$$

式中　$\mu$——泊松比；

$k$——数据对数目；

$e_l$——轴向应变（%）；

$\overline{e_l}$——轴向应变的平均值；

$L_{el}$——轴向引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta L_{el}$——试样轴向变形，单位为 mm；

$L_{et}$——横向引伸计标距，单位为 mm；

$\Delta L_{et}$——试样横向变形，单位为 mm；

$e_t$——横向应变（%）；

$\overline{e_t}$——横向应变的平均值（%）。

**15. 试验结果的数值修约**

杨氏模量、弦线模量和切线模量一般保留 3 位有效数字，泊松比一般保留 2 位有效数字，数值修约按 GB/T 8170 的有关规定。

## 2.14.2　动态法

**1. 试样的制备**

1）按设备条件、材料的密度及模量的估计值选择试样的尺寸。试样的最小质量由拾振系统的检测灵敏度决定，一般不小于 5g。试样尺寸和质量的最大值由激励系统供给的能量和所允许的空间大小决定。

2）推荐的试样长度为 120～180mm，对于圆杆、管，直（外）径为 4～8mm，长度约为直径的 30 倍。只检测弯曲共振频率时，直径可到 2mm。对于矩形杆，厚度为 1～4mm，宽度为 5～10mm。

3）试样材质均匀，平直；横向尺寸的轴向不均匀性应不大于 0.7%；表面无缺陷，表面粗糙度 $Ra$ 不大于 1.6μm，相对表面的平行度误差应在 0.02mm 以内。

4）检测高温下圆杆、管试样的扭转共振频率时，若共振信号微弱，可采用哑铃状试样或以销钉固定悬丝的办法进行扭共振频率的相对测量。

**2. 试验设备**

（1）量具

1）游标卡尺：测量试样长度，最小分度不大于 0.05mm。

2）千分尺：测量试样的直径或宽度、厚度，最小分度不大于 0.002mm。

3）天平：称量试样质量，感量不大于 0.001g。

4）测温装置：在不同温度下试验中用来测量试样的环境温度，用校准后的热电偶测量，测温装置的准确度应达到 ±0.5℃，其位置应接近试样中部，注意与试样的距离应不大于 5mm，同时不要触及试样。

（2）共振测量装置　可完成不同温度下性能检测的装置如图 2-74 所示。用数字频率计来完成引致试样共振的振荡器输出频率的精准测量；按功能的不同，换能器分为激励器与拾振器两种；以选频放大器内附的交流电压表检测共振信号。若需要以李沙育图形来判断虚假共振，应将振荡器与放大器的输出分别供给示波器的水平与垂直偏转板。

1）音频振荡器：在 100Hz 到不小于 30kHz 范围内有连续可变的频率输出。在一般测量中，在任一确定位置上的频率漂移应低于 0.1Hz/min。其输出功率应可保证所用激

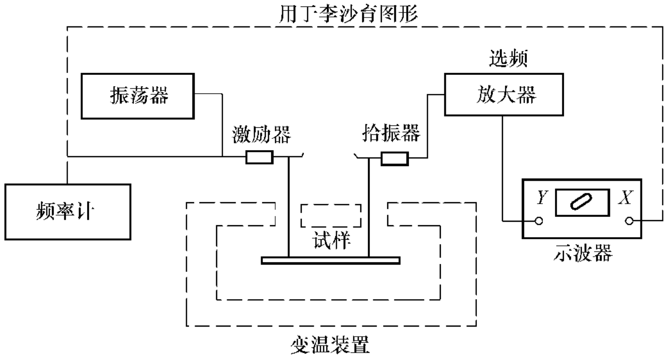



图 2-74　共振检测装置方框图

励换能器能够激发质量在规定范围内的任何试样。

2）数字频率计：可用于振动周期测量的计数式频率计。测量误差不大于 0.01Hz，其晶振稳定度应不低于 $10^{-8}$/d 量级。

3）换能器：依耦合方式和被测试样的质量、共振频率的不同而选择不同类型的换能器。在所检测的试样频率变化的范围内，激励的输出功率损失应不大于 3dB，拾振器应有尽可能好的频率响应。一般可用压电式换能器，如盒式的压电陶瓷换能器。如果试样质量较小（一般为 5 ~ 15g），可用晶体唱头。对于矩形杆，亦可以动圈式扬声器作为激励器，以耳塞机作为拾振器。

4）选频放大器：输入阻抗应与拾振换能器的阻抗匹配，频率范围应可满足测试需要，对共振信号的测试灵敏度应不低于 1μV。推荐采用锁定放大器或配有带通滤波器的传声放大器。

5）示波器：频响范围及灵敏度应能满足测试需要的通用示波器。

（3）变温装置

1）加热炉：所用加热炉的升、降温应是可控制的。在所测的温度范围内，均温区应大于试样长度，一般为 180mm，均温区的均匀性应小于 ±5℃。

2）低温槽：所用低温槽的温度应可控制并可保证不结霜。在所检测的温度范围内，试样长度范围内的温度均匀性应小于 ±5℃。

**3. 试验条件及操作要求**

（1）几何尺寸与质量的测量　将试样清洗后进行测量。长度取两次测量的均值。检测杨氏模量时，试样的直径或厚度取沿长度方向 10 等分后分别测量的均值。检测切变模量时，横向尺寸取 5 等分后分别测量的均值。质量测至 1mg。

（2）能量耦合方法　按下面方法进行：

1）依测试需要，可采用机械、静电、电磁任一种能量耦合方法。

2）无论采用哪一种耦合方法，都应该尽可能保证试样处于水平位置及其自由振动状态，以排除由支撑阻尼造成的试样共振频率的可察觉的变化。

3）推荐的悬丝耦合是机械耦合中常用的一种，耦合方法如图 2-75 所示。无论采用图中哪一种悬吊方法，都需满足试样一次悬吊进行后弯振频率相继测量的需要。对于圆

杆、管状试样，采用图 2-75b 所示方法效果更好。若只检测试样的弯曲共振频率，建议使两根悬线与试样的中轴线处于同一平面内。要求所用的悬丝柔软且有必要的强度，悬吊试样后能张紧。在 100℃以下的检测中，推荐采用棉线作为悬丝，以保证悬丝与试样表面间有较大的摩擦力。

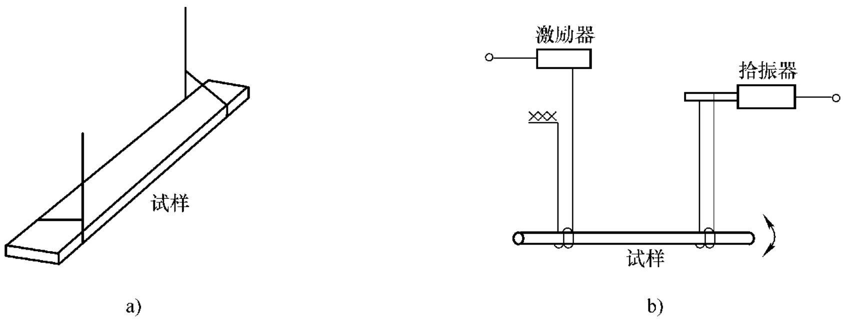



图 2-75　用于弯曲共振与扭转共振的悬丝耦合方法
a）弯曲共振　b）扭曲共振

在高温测量中，推荐采用石英玻璃纤维，亦可在炉子的内、外分别采用两种不同材质的悬丝。在测量质量较大的试样时，可采用直径 0.15mm 以下的铜丝或镍铬丝。推荐的悬吊位置为（0.200～0.215）$l$ 或 0.238$l$，$l$ 为试样的长度。由此引致的弯曲共振基频频率测量的系统偏差不大于 0.01%，扭转共振基频频率的系统误差不大于 0.1%。若共振信号微弱，可将悬吊位置外移，但此时测量的精度相应降低。可采用变更悬吊位置，将所得共振频率外推到节点的办法来消除由偏离节点所致的系统偏差。在测量过程中，应注意防止由悬丝共振而产生的对试样共振测量的干扰。

4）静电耦合方式可有效地排除系统共振的影响，易得到较高的测量精度，图2-76a 适于弯曲共振基频频率的检测，图 2-76b 适于扭转共振基频频率的检测。在高温测量中，应注意排除由气体分子电离所致噪声的影响。

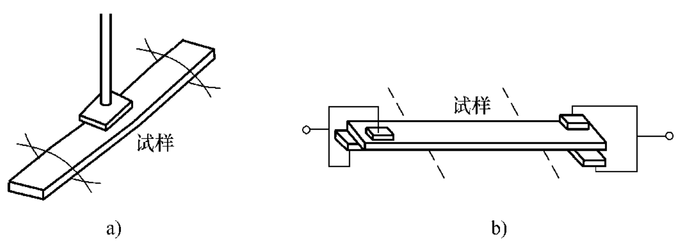
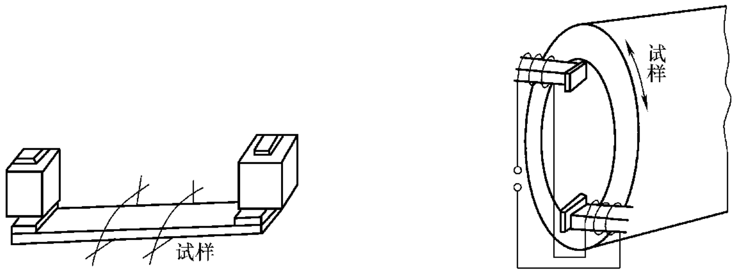



图 2-76　静电耦合方法
a）弯曲共振用耦合　b）扭转共振用耦合

5）采用电磁耦合方式可获得较高的测量灵敏度。图 2-77a 适于弯曲共振基频频率的检测，图 2-77b 适于扭转共振基频频率的检测。这种测量可在铁磁性材料居里点以下温度进行。在精确测量中，应对铁磁性材料 $\Delta E$ 效应的影响进行修正，对非铁磁性材料

则应考虑到附加质量的影响。




a)　　b)

图 2-77　电磁耦合方法

a）弯曲共振用耦合　b）扭转共振用耦合

（3）共振调谐　按被测试样模量的估计值和测得的静态参数，完成共振频率估算。将试样安装好，起动装置，将适于激励试样的、尽可能低的功率输给激励换能器。选择放大器的频率范围和增益，使之足以检测试样的共振。调节示波器，使在试样共振时能得到清晰的李沙育图形。在预定的频率范围内进行扫描，得到稳定的共振显示。

（4）鉴频方法　可用粉纹法和阻尼法分别完成对矩形杆和圆杆、管室温下振动模式和级次的鉴别。在利用粉纹图法时，将硅胶粉末均匀地撒在试样的表面上，在疑为试样共振的频率位置，增加振荡器的输出功率。试样共振时，会看到这些粉末聚集到试样的节点（线）处。在利用阻尼法时，沿着试样的长度方向轻轻触及不同部位，试样共振时，会发现共振示值有明显的不同反应：在波节（节点）处无反应，在波腹处有明显的衰减。两端自由杆弯曲共振与扭转共振节点的分布如图 2-78 所示。

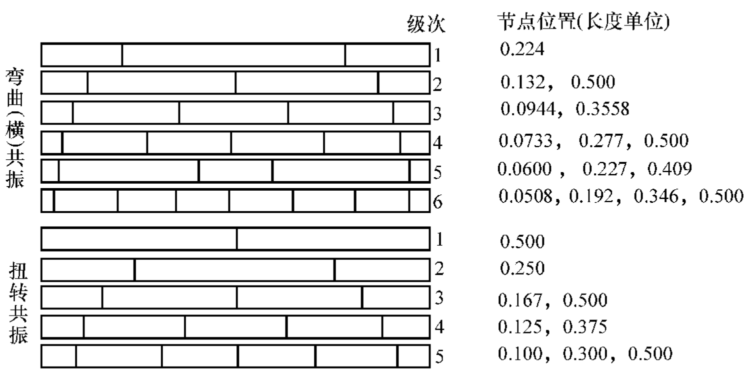



图 2-78　节点位置分布示意图

频率比法也是常用的鉴频方法。若测定的共振频率 $f_1$ 与相继测出的频率 $f_2$ 之比符合表 2-39，则即为弯曲共振基频频率；表中 $\bar{r}$ 是试样的回转半径，$d$ 是试样直径，$h$ 是试样的厚度，$l$ 是试样的长度。在测量圆杆、管扭转共振的基频频率时，常在预定的频率观测位置附近看到三个共振峰，其中两个是试样弯曲共振的同一振动级次下的共振

峰。由于试样常有一定的圆度误差，使我们在频响曲线上看到对应着同一振动级次的两个弯曲共振峰。此时需用频率比法作进一步的鉴别：求所测频率与试样弯振基频频率的比值，如果该值与表 2-40 中的某一数值相近，则所测频率就可能是弯振频率。此时亦可检测扭共振一次谐波的频率；不同振动级次的圆杆、管扭振频率间成简单整数比。

变温测量中的鉴频可用频率比法，区别虚假共振可用李沙育图形法。在共振频率 $f_r$ 的附近进行频率扫描时，$f_r$ 两侧的拾振信号的相位会有突然的变化，因而导致李沙育图形的摆动，据此可判别所确定的共振频率是否真实。

**表 2-39　弯曲共振杆、管一次谐波与基频波的频率比 $K$（2，1）**

| $\bar{r}/l$ | $\mu$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| 0.0000 | 2.7566 | 2.7566 | 2.7566 | 2.7566 | 2.7566 | 2.7566 | 2.7566 |
| 0.0025 | 2.7553 | 2.7553 | 2.7553 | 2.7553 | 2.7553 | 2.7552 | 2.7552 |
| 0.0050 | 2.7516 | 2.7515 | 2.7514 | 2.7513 | 2.7512 | 2.7511 | 2.7510 |
| 0.0075 | 2.7454 | 2.7452 | 2.7450 | 2.7448 | 2.7446 | 2.7444 | 2.7442 |
| 0.0100 | 2.7368 | 2.7364 | 2.7361 | 2.7358 | 2.7354 | 2.7351 | 2.7347 |
| 0.0125 | 2.7260 | 2.7254 | 2.7249 | 2.7244 | 2.7239 | 2.7233 | 2.7228 |
| 0.0150 | 2.7131 | 2.7123 | 2.7116 | 2.7108 | 2.7101 | 2.7093 | 2.7086 |
| 0.0175 | 2.6982 | 2.6972 | 2.6962 | 2.6952 | 2.6942 | 2.6933 | 2.6923 |
| 0.0200 | 2.6816 | 2.6803 | 2.6791 | 2.6778 | 2.6766 | 2.6754 | 2.6742 |
| 0.0225 | 2.6634 | 2.6619 | 2.6603 | 2.6588 | 2.6573 | 2.6558 | 2.6543 |
| 0.0250 | 2.6439 | 2.6420 | 2.6402 | 2.6384 | 2.6366 | 2.6348 | 2.6331 |
| 0.0275 | 2.6232 | 2.6210 | 2.6189 | 2.6168 | 2.6147 | 2.6127 | 2.6107 |
| 0.0300 | 2.6015 | 2.5990 | 2.5966 | 2.5942 | 2.5919 | 2.5896 | 2.5873 |
| 0.0325 | 2.5790 | 2.5763 | 2.5736 | 2.5709 | 2.5683 | 2.5657 | 2.5631 |
| 0.0350 | 2.5560 | 2.5529 | 2.5499 | 2.5470 | 2.5441 | 2.5412 | 2.5384 |
| 0.0375 | 2.5325 | 2.5292 | 2.5259 | 2.5227 | 2.5195 | 2.5164 | 2.5133 |
| 0.0400 | 2.5088 | 2.5052 | 2.5016 | 2.4982 | 2.4948 | 2.4914 | 2.4881 |
| 0.0425 | 2.4849 | 2.4810 | 2.4773 | 2.4736 | 2.4699 | 2.4663 | 2.4628 |
| 0.0450 | 2.4610 | 2.4569 | 2.4529 | 2.4490 | 2.4451 | 2.4413 | 2.4376 |
| 0.0475 | 2.4373 | 2.4330 | 2.4287 | 2.4246 | 2.4205 | 2.4165 | 2.4126 |
| 0.0500 | 2.4137 | 2.4092 | 2.4048 | 2.4005 | 2.3962 | 2.3920 | 2.3879 |

注：圆杆 $\bar{r}=\frac{1}{4}d$；圆管 $\bar{r}=\frac{1}{4}\sqrt{d_1^2+d_2^2}$，矩形杆 $\bar{r}=h\ \sqrt{12}$。

**表 2-40　圆杆、管弯曲共振三次谐频 $f_{t4}$、四次谐频 $f_{t5}$ 与基频 $f_{t1}$ 的比值**

| $\bar{r}/l$ | $K(4,1)$ | | | $K(5,1)$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\mu$ | | | | | |
| | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.20 | 0.30 | 0.40 |
| 0.0000 | 8.9330 | 8.9330 | 8.9330 | 13.3450 | 13.3450 | 13.3450 |
| 0.0025 | 8.9147 | 8.9140 | 8.9133 | 13.3026 | 13.3010 | 13.2995 |
| 0.0050 | 8.8605 | 8.8579 | 8.8553 | 13.1782 | 13.1720 | 13.1659 |
| 0.0075 | 8.7728 | 8.7670 | 8.7613 | 12.9791 | 12.9658 | 12.9528 |
| 0.0100 | 8.6550 | 8.6451 | 8.6355 | 12.7165 | 12.6944 | 12.6728 |
| 0.0125 | 8.5113 | 8.4968 | 8.4826 | 12.4037 | 12.3719 | 12.3410 |
| 0.0150 | 8.3468 | 8.3272 | 8.3082 | 12.0544 | 12.0128 | 11.9724 |

（续）

| $\bar{r}/l$ | $K(4,1)$ | | | $K(5,1)$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\mu$ | | | | | |
| | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.20 | 0.30 | 0.40 |
| 0.0175 | 8.1662 | 8.1416 | 8.1177 | 11.6816 | 11.6307 | 11.5815 |
| 0.0200 | 7.9743 | 7.9448 | 7.9162 | 11.2969 | 11.2375 | 11.1803 |
| 0.0225 | 7.7755 | 7.7413 | 7.7083 | 10.9095 | 10.8429 | 10.7788 |
| 0.0250 | 7.5734 | 7.5351 | 7.4981 | 10.5269 | 10.4542 | 10.3845 |
| 0.0275 | 7.3713 | 7.3292 | 7.2888 | 10.1546 | 10.0769 | 10.0028 |
| 0.0300 | 7.1715 | 7.1263 | 7.0830 | 9.7961 | 9.7148 | 9.6372 |
| 0.0325 | 6.9762 | 6.9283 | 6.8825 | 9.4541 | 9.3699 | 9.2899 |
| 0.0350 | 6.7866 | 6.7366 | 6.6888 | 9.1298 | 9.0437 | 8.9620 |
| 0.0375 | 6.6040 | 6.5523 | 6.5029 | 8.8238 | 8.7366 | 8.6539 |
| 0.0400 | 6.4289 | 6.3758 | 6.3254 | 8.5361 | 8.4484 | 8.3653 |
| 0.0425 | 6.2617 | 6.2077 | 6.1564 | 8.2664 | 8.1786 | 8.0956 |
| 0.0450 | 6.1026 | 6.0480 | 5.9962 | 8.0140 | 7.9265 | 7.8440 |
| 0.0475 | 5.9516 | 5.8966 | 5.8445 | 7.7780 | 7.6912 | 7.6094 |
| 0.0500 | 5.8086 | 5.7535 | 5.7013 | 7.5576 | 7.4716 | 7.3908 |

注：圆杆 $\bar{r}=\frac{1}{4}d$；圆管 $\bar{r}=\frac{1}{4}\sqrt{d_1^2+d_2^2}$。

（5）横向尺寸较小试样弯曲共振频率的检测　试样平行振动方向的横向尺寸的减小伴随着共振频率的降低，当基频共振频率低于100Hz时，检测发生困难。此时，对于矩形杆，可将试样沿其纵轴转90°，将原来的宽度作为厚度重新检测，即采用棱相悬挂方法；对于圆杆、管，可检测一次谐波的共振频率。如果条件许可，亦可采用缩短试样长度的方法来完成检测。

（6）高温下的测量　完成室温下的全部测量后，将试样放进炉子，做好密封，同时做好换能器的热绝缘，测定试样在炉子腔体中的室温频率。以可控速率加热炉子，升温速率不得超过150℃/h。在阶梯式升温中，以20～25℃为测量间隔，保温时间以得到可重现的频率测量值来确定。亦可伴随炉温变化进行随炉测量，时间间隔一般取15min。当对随炉测量结果有争议时，以阶梯式测量结果为准。在试验过程中，应密切跟踪共振频率随温度的变化，以排除干扰，保证结果的可靠性。为防止高温下试样氧化增重、脱碳等不利因素，视需要可在真空或惰性气体中完成测量。在真空中测量，有利于共振的观测，但需注意修正温度滞后的影响。如果有必要，亦可进行冷却过程中的测量。在试验过程中，如果试样发生了严重翘曲，则这种测量结果是可怀疑的，应及时中断测量。

（7）低温下的测量　先在室温下测量试样在空气中的质量、几何尺寸和共振频率，随后置于低温槽中并做好密封，测量试样在低温槽中的室温共振频率，使试样降到所需要的最低温度，在该温度下保温15min以上。在降温过程中，应随时监视共振频率的变化。测量加热过程中的数据，加热速率应不超过50℃/h，每隔10min或15℃完成一次测量。根据需要和设备条件，亦可在降温过程中完成测量，降温程序参照上述制定。为防止低温槽泄出水蒸气形成沉积于试样上的霜，建议在制冷前用干燥的氮气冲刷低

温槽。

**4. 室温动态杨氏模量**

（1）圆杆的室温动态杨氏模量　将测得的试样的质量 $m$、长度 $l$、平均直径 $d$、反复检测的弯振基频共振频率均值 $f_1$ 及修正系数 $T_1$ 代入下式，即可求得动态杨氏模量 $E_d$。

$$E_d = 1.6067 \times 10^{-9}\left(\frac{l}{d}\right)^3 \frac{m}{d} f_1^2 T_1$$

式中　$E_d$——动态杨氏模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$d$——试样直径，单位为 mm；

$m$——试样质量，单位为 g；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz；

$T_1$——修正系数，可从表 2-41 中查出。

当以试样的一次谐波的共振频率 $f_2$ 进行计算时，应以 $f_2/K$（2，1）作为 $f_1$ 代入上式完成计算。频率比 $K$（2，1）可由表 2-39 查出。

**表 2-41　基频弯曲共振圆杆、管的修正系数**

| $\bar{r}/l$ | $\mu$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 0.0025 | 1.0005 | 1.0005 | 1.0005 | 1.0005 | 1.0005 | 1.0005 | 1.0005 |
| 0.0050 | 1.0020 | 1.0021 | 1.0021 | 1.0021 | 1.0021 | 1.0021 | 1.0022 |
| 0.0075 | 1.0046 | 1.0046 | 1.0047 | 1.0047 | 1.0048 | 1.0048 | 1.0049 |
| 0.0100 | 1.0081 | 1.0082 | 1.0083 | 1.0084 | 1.0085 | 1.0086 | 1.0087 |
| 0.0125 | 1.0127 | 1.0128 | 1.0130 | 1.0131 | 1.0133 | 1.0134 | 1.0136 |
| 0.0150 | 1.0183 | 1.0185 | 1.0187 | 1.0189 | 1.0191 | 1.0193 | 1.0195 |
| 0.0175 | 1.0249 | 1.0252 | 1.0255 | 1.0257 | 1.0260 | 1.0263 | 1.0266 |
| 0.0200 | 1.0325 | 1.0329 | 1.0332 | 1.0336 | 1.0340 | 1.0344 | 1.0347 |
| 0.0225 | 1.0411 | 1.0416 | 1.0421 | 1.0426 | 1.0430 | 1.0435 | 1.0440 |
| 0.0250 | 1.0507 | 1.0513 | 1.0519 | 1.0525 | 1.0531 | 1.0537 | 1.0543 |
| 0.0275 | 1.0614 | 1.0621 | 1.0628 | 1.0636 | 1.0643 | 1.0650 | 1.0657 |
| 0.0300 | 1.0731 | 1.0739 | 1.0748 | 1.0756 | 1.0765 | 1.0773 | 1.0782 |
| 0.0325 | 1.0857 | 1.0868 | 1.0878 | 1.0888 | 1.0898 | 1.0908 | 1.0917 |
| 0.0350 | 1.0994 | 1.1006 | 1.1018 | 1.1030 | 1.1041 | 1.1053 | 1.1064 |
| 0.0375 | 1.1142 | 1.1155 | 1.1169 | 1.1182 | 1.1195 | 1.1208 | 1.1221 |
| 0.0400 | 1.1299 | 1.1314 | 1.1330 | 1.1345 | 1.1360 | 1.1375 | 1.1389 |
| 0.0425 | 1.1466 | 1.1484 | 1.1501 | 1.1518 | 1.1535 | 1.1552 | 1.1569 |
| 0.0450 | 1.1644 | 1.1664 | 1.1683 | 1.1702 | 1.1721 | 1.1740 | 1.1759 |
| 0.0475 | 1.1832 | 1.1854 | 1.1875 | 1.1896 | 1.1918 | 1.1939 | 1.1959 |
| 0.0500 | 1.2030 | 1.2054 | 1.2078 | 1.2101 | 1.2125 | 1.2148 | 1.2171 |

注：圆杆 $\bar{r} = \frac{1}{4}d$；圆管 $\bar{r} = \frac{1}{4}\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$。

（2）管的室温动态杨氏模量　将测得的试样质量 $m$、长度 $l$、管外径 $d_1$ 和内径 $d_2$ 的平均值、经反复检测的弯振基频共振频率均值 $f_1$ 及修正系数 $T_1$ 代入下式，即可求得动态杨氏模量 $E_d$。

$$E_d = 1.6067 \times 10^{-9} \frac{l^3 m}{d_1^4 - d_2^4} f_1^2 T_1$$

式中　$E_d$——动态杨氏模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$m$——试样质量，单位为 g；

$d_1$——管的外径，单位为 mm；

$d_2$——管的内径，单位为 mm；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz；

$T_1$——修正系数，可从表 2-41 中查出。

（3）矩形杆的室温动态杨氏模量　将测得的试样质量 $m$、长度 $l$、平均厚度 $h$、经反复检测的弯振基频共振频率值 $f_1$ 及修正系数 $T_1$ 代入下式，即可算出动态杨氏模量 $E_d$。

$$E_d = 0.9465 \times 10^{-9} \left(\frac{l}{h}\right)^3 \frac{m}{b} f_1^2 T_1$$

式中　$E_d$——动态杨氏模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$m$——试样质量，单位为 g；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz；

$T_1$——修正系数，可从表 2-42 中查出。

**表 2-42　基频弯曲共振矩形杆的修正系数 $T_1$**

| $h/l$ | $\mu$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| 0.00 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 0.01 | 1.0007 | 1.0007 | 1.0007 | 1.0007 | 1.0007 | 1.0008 | 1.0008 |
| 0.02 | 1.0027 | 1.0028 | 1.0028 | 1.0029 | 1.0030 | 1.0031 | 1.0032 |
| 0.03 | 1.0061 | 1.0062 | 1.0063 | 1.0065 | 1.0067 | 1.0069 | 1.0071 |
| 0.04 | 1.0108 | 1.0110 | 1.0112 | 1.0115 | 1.0118 | 1.0122 | 1.0126 |
| 0.05 | 1.0169 | 1.0172 | 1.0175 | 1.0180 | 1.0185 | 1.0190 | 1.0196 |
| 0.06 | 1.0243 | 1.0247 | 1.0252 | 1.0258 | 1.0265 | 1.0273 | 1.0282 |
| 0.07 | 1.0330 | 1.0336 | 1.0343 | 1.0351 | 1.0360 | 1.0371 | 1.0383 |
| 0.08 | 1.0430 | 1.0437 | 1.0446 | 1.0457 | 1.0470 | 1.0484 | 1.0500 |
| 0.09 | 1.0543 | 1.0552 | 1.0564 | 1.0577 | 1.0593 | 1.0611 | 1.0631 |
| 0.10 | 1.0669 | 1.0680 | 1.0694 | 1.0711 | 1.0730 | 1.0752 | 1.0776 |
| 0.11 | 1.0807 | 1.0821 | 1.0838 | 1.0858 | 1.0881 | 1.0907 | 1.0936 |
| 0.12 | 1.0957 | 1.0974 | 1.0994 | 1.1017 | 1.1045 | 1.1076 | 1.1111 |
| 0.13 | 1.1120 | 1.1139 | 1.1163 | 1.1190 | 1.1222 | 1.1258 | 1.1299 |

（续）

| h/l | μ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 |
| 0.14 | 1.1295 | 1.1317 | 1.1344 | 1.1376 | 1.1412 | 1.1454 | 1.1501 |
| 0.15 | 1.1481 | 1.1506 | 1.1537 | 1.1573 | 1.1615 | 1.1663 | 1.1717 |
| 0.16 | 1.1679 | 1.1708 | 1.1742 | 1.1784 | 1.1831 | 1.1885 | 1.1946 |
| 0.17 | 1.1889 | 1.1921 | 1.1960 | 1.2006 | 1.2059 | 1.2120 | 1.2188 |
| 0.18 | 1.2110 | 1.2145 | 1.2188 | 1.2240 | 1.2299 | 1.2367 | 1.2442 |
| 0.19 | 1.2342 | 1.2381 | 1.2429 | 1.2485 | 1.2551 | 1.2626 | 1.2710 |
| 0.20 | 1.2584 | 1.2627 | 1.2680 | 1.2743 | 1.2815 | 1.2898 | 1.2990 |

**5. 室温动态切变模量**

（1）圆杆的动态切变模量　将测得的试样密度$\rho$、长度$l$、平均直径$d$、经反复检测的基频共振频率均值$f_1$代入下式，即可得动态切变模量$G_d$。

$$G_d = 4.000 \times 10^{-3} \rho l^2 f_1^2$$

式中　$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$\rho$——试样密度，单位为 g/cm³；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz。

当模量以 GPa 为单位时：$G_d = 4.000 \times 10^{-12} \rho l^2 f_1^2$。

当密度未知时：$G_d = 5.093 \times 10^{-9} \dfrac{ml}{d^2} f_1^2$

式中　$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$d$——试样直径，单位为 mm；

$m$——试样质量，单位为 g；

$f_1$——反基频共振频率，单位为 Hz。

（2）圆管的动态切变模量　如果密度已知，由下式可得到圆管的切变模量值。

$$G_d = 4.000 \times 10^{-12} \rho l^2 f_1^2$$

式中　$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$\rho$——试样密度，单位为 g/cm³；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz。

如果密度未知，由下式计算圆管的切变模量。

$$G_d = 5.093 \times 10^{-9} \frac{ml}{d_1^2 - d_2^2} f_1^2$$

式中　$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$d_1$——管的外径，单位为 mm；

$d_2$——管的内径，单位为 mm；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz。

（3）矩形杆的动态切变模量　当密度已知时，可得到动态切变模量，当模量以 GPa 为单位时：

$$G_d = 4.000 \times 10^{-12} \rho l^2 R_n (f_n / n)^2$$

式中　$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$\rho$——试样密度，单位为 g/cm$^3$；

$f_n$——$n$ 基次振动频率，单位为 Hz；

$n$——振动基次；

$R_n$——矩形杆的形状因子，由下式计算：

$$R_n = \frac{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}{4 - 2.521\frac{h}{b}\left(1 - \frac{1.991}{e^{\frac{1.991}{(\pi b)/h + 1}}}\right)}\left(1 + \frac{0.00851 n^2 b^2}{l^2}\right) - 0.060\left(\frac{nb}{h}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{b}{h} - 1\right)^2$$

式中　$R_n$——矩形杆的形状因子；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$n$——振动基次；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

当密度未知时：$G_d = 4.000 \times 10^{-9} \frac{ml}{bh} R_1 \ f_1^2$

式中　$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa；

$l$——试样长度，单位为 mm；

$m$——试样质量，单位为 g；

$f_1$——基频共振频率，单位为 Hz；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$R_1$——基频扭共振时矩形杆的形状因子，见表 2-43。

**表 2-43　基频扭转共振矩形杆的形状因子**

| b/h | b/l | | | b/h | b/l | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.025 | 0.055 | 0.085 | | 0.025 | 0.055 | 0.085 |
| 1.00 | 1.1856 | 1.1856 | 1.1857 | 1.45 | 1.3504 | 1.3503 | 1.3502 |
| 1.05 | 1.1883 | 1.1883 | 1.1884 | 1.50 | 1.3834 | 1.3833 | 1.3832 |
| 1.10 | 1.1960 | 1.1960 | 1.1961 | 1.55 | 1.4187 | 1.4186 | 1.4184 |
| 1.15 | 1.2081 | 1.2081 | 1.2081 | 1.60 | 1.4561 | 1.4559 | 1.4557 |
| 1.20 | 1.2240 | 1.2240 | 1.2240 | 1.65 | 1.4954 | 1.4952 | 1.4950 |
| 1.25 | 1.2434 | 1.2434 | 1.2434 | 1.70 | 1.5367 | 1.5365 | 1.5362 |
| 1.30 | 1.2660 | 1.2660 | 1.2660 | 1.75 | 1.5799 | 1.5797 | 1.5793 |
| 1.35 | 1.2915 | 1.2915 | 1.2915 | 1.80 | 1.6249 | 1.6246 | 1.6242 |
| 1.40 | 1.3197 | 1.3197 | 1.3196 | 1.85 | 1.6716 | 1.6713 | 1.6708 |

（续）

| b/h | b/l | | | b/h | b/l | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.025 | 0.055 | 0.085 | | 0.025 | 0.055 | 0.085 |
| 1.90 | 1.7200 | 1.7196 | 1.7191 | 4.10 | 5.2590 | 5.2539 | 5.2473 |
| 1.95 | 1.7701 | 1.7697 | 1.7691 | 4.15 | 5.3690 | 5.3638 | 5.3569 |
| 2.00 | 1.8218 | 1.8213 | 1.8207 | 4.20 | 5.4803 | 5.4749 | 5.4678 |
| 2.05 | 1.8751 | 1.8745 | 1.8738 | 4.25 | 5.5929 | 5.5874 | 5.5800 |
| 2.10 | 1.9299 | 1.9293 | 1.9285 | 4.30 | 5.7068 | 5.7010 | 5.6935 |
| 2.15 | 1.9863 | 1.9857 | 1.9848 | 4.35 | 5.8219 | 5.8160 | 5.8082 |
| 2.20 | 2.0442 | 2.0435 | 2.0425 | 4.40 | 5.9383 | 5.9322 | 5.9242 |
| 2.25 | 2.1036 | 2.1028 | 2.1018 | 4.45 | 6.0559 | 6.0497 | 6.0414 |
| 2.30 | 2.1645 | 2.1636 | 2.1625 | 4.50 | 6.1748 | 6.1684 | 6.1599 |
| 2.35 | 2.2268 | 2.2258 | 2.2246 | 4.55 | 6.2950 | 6.2884 | 6.2796 |
| 2.40 | 2.2905 | 2.2895 | 2.2882 | 4.60 | 6.4165 | 6.4097 | 6.4007 |
| 2.45 | 2.3557 | 2.3546 | 2.3532 | 4.65 | 6.5392 | 6.5322 | 6.5230 |
| 2.50 | 2.4223 | 2.4211 | 2.4196 | 4.70 | 6.6632 | 6.6560 | 6.6465 |
| 2.55 | 2.4903 | 2.4891 | 2.4874 | 4.75 | 6.7885 | 6.7811 | 6.7713 |
| 2.60 | 2.5597 | 2.5584 | 2.5566 | 4.80 | 6.9150 | 6.9074 | 6.8974 |
| 2.65 | 2.6304 | 2.6290 | 2.6272 | 4.85 | 7.0428 | 7.0350 | 7.0247 |
| 2.70 | 2.7026 | 2.7011 | 2.6991 | 4.90 | 7.1719 | 7.1638 | 7.1532 |
| 2.75 | 2.7761 | 2.7745 | 2.7724 | 4.95 | 7.3022 | 7.2939 | 7.2831 |
| 2.80 | 2.8509 | 2.8493 | 2.8470 | 5.00 | 7.4337 | 7.4253 | 7.4142 |
| 2.85 | 2.9271 | 2.9254 | 2.9230 | 5.05 | 7.5666 | 7.5579 | 7.5465 |
| 2.90 | 3.0047 | 3.0028 | 3.0004 | 5.10 | 7.7007 | 7.6918 | 7.6801 |
| 2.95 | 3.0836 | 3.0816 | 3.0790 | 5.15 | 7.8360 | 7.8270 | 7.8150 |
| 3.00 | 3.1638 | 3.1617 | 3.1590 | 5.20 | 7.9727 | 7.9634 | 7.9511 |
| 3.05 | 3.2454 | 3.2432 | 3.2403 | 5.25 | 8.1106 | 8.1010 | 8.0884 |
| 3.10 | 3.3283 | 3.3260 | 3.3229 | 5.30 | 8.2497 | 8.2399 | 8.2271 |
| 3.15 | 3.4125 | 3.4100 | 3.4069 | 5.35 | 8.3901 | 8.3801 | 8.3669 |
| 3.20 | 3.4980 | 3.4954 | 3.4921 | 5.40 | 8.5318 | 8.5215 | 8.5080 |
| 3.25 | 3.5848 | 3.5821 | 3.5787 | 5.45 | 8.6747 | 8.6642 | 8.6504 |
| 3.30 | 3.6729 | 3.6702 | 3.6665 | 5.50 | 8.8189 | 8.8082 | 8.7940 |
| 3.35 | 3.7624 | 3.7595 | 3.7557 | 5.55 | 8.9643 | 8.9534 | 8.9389 |
| 3.40 | 3.8531 | 3.8501 | 3.8461 | 5.60 | 9.1110 | 9.0998 | 9.0851 |
| 3.45 | 3.9452 | 3.9420 | 3.9379 | 5.65 | 9.2589 | 9.2475 | 9.2324 |
| 3.50 | 4.0385 | 4.0352 | 4.0309 | 5.70 | 9.4081 | 9.3965 | 9.3811 |
| 3.55 | 4.1331 | 4.1297 | 4.1252 | 5.75 | 9.5586 | 9.5467 | 9.5310 |
| 3.60 | 4.2291 | 4.2255 | 4.2208 | 5.80 | 9.7103 | 9.6982 | 9.6821 |
| 3.65 | 4.3263 | 4.3226 | 4.3177 | 5.85 | 9.8633 | 9.8509 | 9.8345 |
| 3.70 | 4.4248 | 4.4210 | 4.4159 | 5.90 | 10.0176 | 10.0049 | 9.9881 |
| 3.75 | 4.5246 | 4.5206 | 4.5154 | 5.95 | 10.1731 | 10.1601 | 10.1430 |
| 3.80 | 4.6256 | 4.6215 | 4.6161 | 6.00 | 10.3298 | 10.3166 | 10.2991 |
| 3.85 | 4.7280 | 4.7237 | 4.7181 | 6.05 | 10.4878 | 10.4743 | 10.4565 |
| 3.90 | 4.8316 | 4.8272 | 4.8214 | 6.10 | 10.6471 | 10.6333 | 10.6152 |
| 3.95 | 4.9366 | 4.9320 | 4.9260 | 6.15 | 10.8076 | 10.7936 | 10.7751 |
| 4.00 | 5.0428 | 5.0380 | 5.0318 | 6.20 | 10.9694 | 10.9551 | 10.9362 |
| 4.05 | 5.1502 | 5.1454 | 5.1389 | 6.25 | 11.1324 | 11.1178 | 11.0986 |

（续）

| b/h | b/l | | | b/h | b/l | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.025 | 0.055 | 0.085 | | 0.025 | 0.055 | 0.085 |
| 6.30 | 11.2967 | 11.2818 | 11.2622 | 8.15 | 18.2563 | 18.2292 | 18.1934 |
| 6.35 | 11.4622 | 11.4471 | 11.4271 | 8.20 | 18.4682 | 18.4407 | 18.4044 |
| 6.40 | 11.6290 | 11.6136 | 11.5932 | 8.25 | 18.6813 | 18.6535 | 18.6167 |
| 6.45 | 11.7971 | 11.7814 | 11.7606 | 8.30 | 18.8957 | 18.8675 | 18.8302 |
| 6.50 | 11.9664 | 11.9504 | 11.9292 | 8.35 | 19.1114 | 19.0828 | 19.0449 |
| 6.55 | 12.1369 | 12.1206 | 12.0991 | 8.40 | 19.3283 | 19.2993 | 19.2609 |
| 6.60 | 12.3087 | 12.2921 | 12.2702 | 8.45 | 19.5464 | 19.5170 | 19.4782 |
| 6.65 | 12.4818 | 12.4649 | 12.4426 | 8.50 | 19.7658 | 19.7360 | 19.6966 |
| 6.70 | 12.6561 | 12.6389 | 12.6162 | 8.55 | 19.9865 | 19.9563 | 19.9163 |
| 6.75 | 12.8317 | 12.8142 | 12.7911 | 8.60 | 20.2084 | 20.1778 | 20.1373 |
| 6.80 | 13.0085 | 12.9907 | 12.9672 | 8.65 | 20.4315 | 20.4005 | 20.3595 |
| 6.85 | 13.1866 | 13.1685 | 13.1446 | 8.70 | 20.6559 | 20.6245 | 20.5830 |
| 6.90 | 13.3659 | 13.3475 | 13.3232 | 8.75 | 20.8816 | 20.8498 | 20.8077 |
| 6.95 | 13.5465 | 13.5278 | 13.5030 | 8.80 | 21.1085 | 21.0763 | 21.0336 |
| 7.00 | 13.7283 | 13.7093 | 13.6841 | 8.85 | 21.3366 | 21.3040 | 21.2608 |
| 7.05 | 13.9114 | 13.8921 | 13.8665 | 8.90 | 21.5660 | 21.5330 | 21.4893 |
| 7.10 | 14.0958 | 14.0761 | 14.0501 | 8.95 | 21.7967 | 21.7632 | 21.7189 |
| 7.15 | 14.2814 | 14.2614 | 14.2349 | 9.00 | 22.0286 | 21.9947 | 21.9499 |
| 7.20 | 14.4682 | 14.4479 | 14.4210 | 9.05 | 22.2618 | 22.2274 | 22.1820 |
| 7.25 | 14.6563 | 14.6357 | 14.6083 | 9.10 | 22.4962 | 22.4614 | 22.4154 |
| 7.30 | 14.8457 | 14.8247 | 14.7969 | 9.15 | 22.7318 | 22.6966 | 22.6501 |
| 7.35 | 15.0363 | 15.0150 | 14.9867 | 9.20 | 22.9687 | 22.9331 | 22.8860 |
| 7.40 | 15.2281 | 15.2065 | 15.1778 | 9.25 | 23.2069 | 23.1708 | 23.1231 |
| 7.45 | 15.4213 | 15.3992 | 15.3701 | 9.30 | 23.4163 | 23.4098 | 23.3615 |
| 7.50 | 15.6156 | 15.5933 | 15.5637 | 9.35 | 23.6870 | 23.6500 | 23.6012 |
| 7.55 | 15.8112 | 15.7885 | 15.7585 | 9.40 | 23.9289 | 23.8915 | 23.8421 |
| 7.60 | 16.0081 | 15.9851 | 15.9546 | 9.45 | 24.1721 | 24.1342 | 24.0842 |
| 7.65 | 16.2062 | 16.1828 | 16.1519 | 9.50 | 24.4165 | 24.3782 | 24.3275 |
| 7.70 | 16.4056 | 16.3819 | 16.3504 | 9.55 | 24.6621 | 24.6234 | 24.5722 |
| 7.75 | 16.6062 | 16.5821 | 16.5502 | 9.60 | 24.9091 | 24.8699 | 24.8180 |
| 7.80 | 16.8081 | 16.7836 | 16.7513 | 9.65 | 25.1572 | 25.1176 | 25.0651 |
| 7.85 | 17.0112 | 16.9864 | 16.9536 | 9.70 | 25.4066 | 25.3665 | 25.3135 |
| 7.90 | 17.2156 | 17.1904 | 17.1571 | 9.75 | 25.6573 | 25.6167 | 25.5631 |
| 7.95 | 17.4213 | 17.3957 | 17.3619 | 9.80 | 25.9092 | 25.8682 | 25.8139 |
| 8.00 | 17.6281 | 17.6022 | 17.5679 | 9.85 | 26.1624 | 26.1209 | 26.0659 |
| 8.05 | 17.8363 | 17.8100 | 17.7752 | 9.90 | 26.4168 | 26.3748 | 26.3193 |
| 8.10 | 18.0457 | 18.0190 | 17.9837 | 9.95 | 26.6725 | 26.6300 | 26.5739 |

变温过程中的弹性模量由下式计算：

$$M_t = M_0 (f_t / f_0)^2 [1/(1 + \alpha \Delta t)]$$

式中 $M_t$——温度 $t$ 下的弹性模量，单位为 GPa；

$M_0$——室温下的弹性模量，单位为 GPa；

$f_t$——温度 $t$ 下试样在炉子或槽中的共振频率，单位为 Hz；

$f_0$——室温下试样在炉子或槽中的共振频率，单位为 Hz；

$\alpha$——温度 $t$ 与室温间试样的平均线膨胀系数；

$\Delta t$——温度 $t$ 与室温间的温度差，单位为℃。

**6. 动态泊松比**

任一温度下试样的动态泊松比由同一温度下的动态杨氏模量、动态切变模量值确定：

$$\mu = \left(\frac{E_d}{2G_d}\right) - 1$$

式中　$E_d$——动态杨氏模量，单位为 MPa；

$G_d$——动态切变模量，单位为 MPa。

也可由测得的试样同一温度下的弯曲与扭转的共振频率直接求得该温度下的动态泊松比。

对于圆杆：

$$\mu = 0.15774 T_1 \left(\frac{l}{d}\right)^2 \left(\frac{f_{t1}}{f_{s1}}\right)^2 - 1$$

式中　$T_1$——基频弯曲共振时圆杆试样的室温修正系数；

$l$——试样室温长度，单位为 mm；

$d$——试样室温直径，单位为 mm；

$f_{t1}$——试样弯曲共振基频频率，单位为 Hz；

$f_{s1}$——试样扭转共振进频率，单位为 Hz。

对于圆管：

$$\mu = 0.15774 T_1 \frac{l^2}{d_1^2 + d_2^2} \left(\frac{f_{t1}}{f_{s1}}\right)^2 - 1$$

式中　$l$——试样室温长度，单位为 mm；

$f_{t1}$——试样弯曲共振基频频率，单位为 Hz；

$f_{s1}$——试样扭转共振进频率，单位为 Hz；

$d_1$——管的外径，单位为 mm；

$d_2$——管的内径，单位为 mm。

对于矩形杆：

$$\mu = 0.11831 \left(\frac{T_1}{R_1}\right) \left(\frac{l}{h}\right)^2 \left(\frac{f_{t1}}{f_{s1}}\right)^2 - 1$$

式中　$T_1$——基频弯曲共振时圆杆试样的室温修正系数；

$l$——试样室温长度，单位为 mm；

$h$——室温下平行弯振方向的几何尺寸，单位为 mm；

$R_1$——试样基频扭转共振时的室温形状因子；

$f_{t1}$——试样弯曲共振基频频率，单位为 Hz；

$f_{s1}$——试样扭转共振进频率，单位为 Hz。

**7. 试验结果的数值修约**

对算出的动态杨氏模量、动态切变模量取 3 位有效数字，动态泊松比取 2 位有效数

字，数值修约按 GB/T 8170 的有关规定。

## 2.15　钢丝绳破断拉伸试验

钢丝绳破断拉伸试验按照 GB/T 8358—2006《钢丝绳破断拉伸试验方法》进行。

### 2.15.1　试样

**1. 通用要求**

1）未经使用的钢丝绳，试样应从外观检查合格处截取。

2）在用或已用过的钢丝绳，试样应从相关各方认可处截取。

3）试样两端应用软铁丝或其他材料牢固捆扎。

4）试样最小有效长度（夹头间的距离）应符合表 2-44 的规定。

**表 2-44　试样最小有效长度**　（单位：mm）

| 钢丝绳公称直径 $d$ | 试样最小有效长度 $L$ |
|---|---|
| $d \leqslant 6$ | 300 |
| $6 < d \leqslant 20$ | 600 |
| $d > 20$ | $30d$（一般不超过 2000） |

注：试样长度 = 试样最小有效长度 $L$ + 夹持长度，特殊情况应在报告中说明。

**2. 浇铸法试样制备**

1）在距试样两端一个夹持长度处用软铁丝等材料牢固捆扎，去掉端头捆扎丝，制成帚头状，在任何情况下不得对裸露的钢丝进行矫直，但允许弯曲成钩形。

2）制成帚头状的钢丝绳试样应将纤维芯切至捆扎处。为了浇铸牢固，应清除帚头钢丝表面油污，可沾浸少量助镀剂，但不得损伤钢丝表面。

3）浸渍后的钢丝用铅锡合金或其他合金浇铸成圆锥体，但不得改变钢丝性能。加工后的钢丝绳试样如图 2-79 所示。

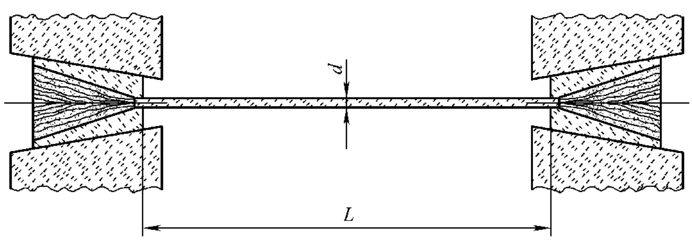



图 2-79　浇铸法试样

$d$—钢丝绳试样直径（mm）　$L$—钢丝绳试样最小有效长度（mm）

**3. 套压法试样制备**

1）先将试样段两端用铁丝捆扎再从钢丝绳上截取。

2）去掉捆扎丝，将试样两端穿入用低碳钢、铝合金或相关材料制成的套管中。套管头内壁应倒角，再在压力机上压紧。铝合金材料套管相关技术要求如表 2-45 所示。

低碳钢可选用抗拉强度 $R_m$ ≥520MPa，断面收缩率 $Z$≥40%，断后伸长率 $A$≥25% 的奥氏体不锈钢、低碳合金钢、低碳结构钢等材料。

3）压紧过程中应避免压伤钢丝。

**表 2-45　铝合金材料套管技术要求**　　（单位：mm）

| 钢丝绳公称直径 | 套管内径 | 套管壁厚 | 套管长度 | 压制力/kN |
|---|---|---|---|---|
| 6 | 6.6 | 2.5 | 25 | 300 |
| 7 | 7.8 | 2.9 | 30 | 350 |
| 8 | 8.8 | 3.3 | 34 | 400 |
| 9 | 9.9 | 3.7 | 38 | 450 |
| 10 | 10.9 | 4.1 | 42 | 500 |
| 11 | 12.1 | 4.5 | 47 | 600 |
| 12 | 13.2 | 4.9 | 50 | 700 |
| 13 | 14.2 | 5.4 | 55 | 800 |
| 14 | 15.3 | 5.8 | 59 | 1000 |
| 16 | 17.5 | 6.7 | 67 | 1200 |
| 18 | 19.6 | 7.6 | 76 | 1400 |
| 20 | 21.7 | 8.4 | 84 | 1600 |
| 22 | 24.3 | 9.2 | 92 | 1800 |
| 24 | 26.4 | 10.0 | 101 | 2000 |
| 26 | 28.5 | 10.9 | 109 | 2250 |
| 28 | 31.0 | 11.7 | 118 | 2550 |
| 30 | 33.1 | 12.5 | 126 | 2950 |
| 32 | 35.2 | 13.4 | 134 | 3400 |
| 34 | 37.8 | 14.2 | 143 | 3800 |
| 36 | 39.8 | 15.0 | 152 | 4300 |
| 38 | 41.9 | 15.8 | 160 | 4800 |
| 40 | 44.0 | 16.6 | 168 | 5300 |
| 44 | 48.6 | 18.2 | 184 | 6200 |
| 48 | 52.2 | 19.8 | 200 | 7300 |
| 52 | 57.3 | 21.4 | 216 | 8600 |
| 56 | 61.5 | 23.0 | 232 | 10000 |
| 60 | 66.0 | 24.6 | 248 | 12000 |

**4. 直接夹持法试样制备**

1）先将试验段两端用铁丝捆扎再截取试样。

2）对于单股钢丝绳或钢绞线，端头钢丝可焊接在一起。

**5. 缠绕法试样制备**

1）将试样直接从钢丝绳上截取，必要时两端用铁丝捆扎。

2）缠绕轮直径与钢丝绳直径关系可按下式计算：

$$h = D_0/d_f + 1$$

式中　$h$——直径比值，$h$ 值应不小于表 2-46 的要求；

$D_0$——缠绕轮直径，单位为 mm；

$d_f$——钢丝绳公称直径，单位为 mm。

**表 2-46　*h* 推荐值**

| 钢丝绳最小破断拉力/kN | <125 | ≥125 |
|---|---|---|
| *h* | 20 | 16 |

3）钢丝绳公称直径与绳槽半径按下式计算：

$$d_f \leqslant 2R - 0.5\text{mm}$$

式中　$d_f$——钢丝绳公称直径，单位为 mm；

$R$——绳槽半径，单位为 mm。

## 2.15.2　试验设备

1）该试验可在任何一种拉伸试验机上进行。

2）试验机应按照 GB/T 16825.1 进行检定，应为 1 级或优于 1 级。

3）试验机夹头间距离应符合表 2-44 的规定。

## 2.15.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）一般情况下，试验应在 10～35℃的室温下进行。如有特殊要求，试验温度应为 23℃ ±5℃。

2）试验时应平稳拉伸，当施加的拉力不大于钢丝绳最小破断拉力的 80% 时，试验力可快速施加，而后应缓慢增加，其施加的应力速率约为 10MPa/s。

3）对于浇铸法，将浇铸好的试样置于钳口座中，即可进行拉伸试验。对于立式拉伸试验机，让下钳口悬空，调整试样，使之与钳口座轴线重合，调整试验机零点后，再实施拉伸试验。

4）对于套压法，将压好套管的试样，直接夹于钳口中，即可实施拉伸试验。

5）对于直接夹持法，将试样两端直接夹持于钳口中，即可实施拉伸试验。

6）对于缠绕法，先将试样一端夹紧，再将试样绕于试验轮上，拉紧试样，最后夹紧另一端，即可实施拉伸试验。

7）若试样在距夹头或切点 1*d*（30mm）内破断，则该试验无效。

8）浇铸法一般适用于绳径大于 6mm 或丝径大于 0.5mm 的钢丝绳；套压法适用于金属芯类钢丝绳的破断拉伸，对于纤维芯钢丝绳，若用套压法，建议在套压处先去掉纤维芯，并以同股径的钢芯充实此段后再套压；缠绕法一般适用于绳径小于 30mm 的钢丝绳，对于直径大于 30mm 的钢丝绳，应采用浇铸法；直接夹持法最适用于 1×3、1×7、1×19 等结构钢丝绳的检验。

**2. 钢丝绳破断拉伸性能的测定**

在满足试验要求的情况下，对试样施加拉力，记录试样断股（单股绳断丝）时的拉力，作为试验破断拉力 $F_m$。

根据规定方法测得的破断拉力（$F_m$）不得低于最小破断拉力的规定值 $F_{min}$，最小破断拉力按下式计算：

$$F_{min} = d^2 R_r K/1000$$

式中　$F_{min}$——钢丝绳最小破断拉力，单位为 kN；

$d$——钢丝绳公称直径，单位为 mm；

$R_r$——钢丝绳公称抗拉强度，单位为 MPa；

$K$——钢丝绳的最小破断拉力换算系数。

**3. 试验结果数值的修约**

钢丝绳破断拉力 $F_m$ 应按 GB/T 8170 的规定修约到小数点后两位（单位为 kN）。

## 2.16　塑料拉伸试验

塑料拉伸试验按照 GB/T 1040.1—2006《塑料　拉伸性能的测定　第 1 部分：总则》、GB/T 1040.2—2006《塑料　拉伸性能的测定　第 2 部分：模塑和挤塑塑料的试验条件》、GB/T 1040.3—2006《塑料拉伸性能的测定第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件》、GB/T 1040.4—2006《塑料　拉伸性能的测定第 4 部分：各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件》和 GB/T 1040.5—2008《塑料　拉伸性能的测定　第 5 部分：单向纤维增强复合材料的试验条件》进行。

### 2.16.1　试样

**1. 模塑和挤塑塑料试样**

（1）形状和尺寸　只要可能，试样应为如图 2-80 和表 2-47 所示的 1A 型和 1B 型的哑铃形试样，直接模塑的多用途试样选用 1A 型，机加工试样选用 1B 型。

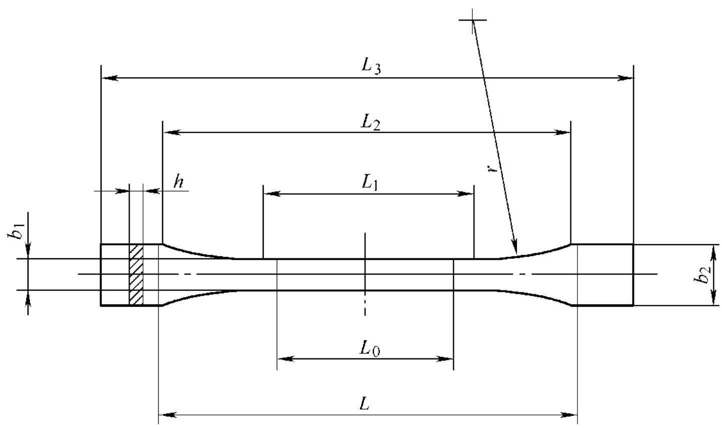



图 2-80　1A 型和 1B 型试样的形状

**表 2-47　1A 型和 1B 型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符　　号 | 名　　称 | 1A 型 | 1B 型 |
|---|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 115 ± 1 | $L_2{}^{+5}_{0}$ |
| $L_0$ | 标距 | 50.0 ± 0.5 | 50.0 ± 0.5 |

（续）

| 符　号 | 名　称 | 1A 型 | 1B 型 |
|---|---|---|---|
| $L_1$ | 窄平行部分的长度 | 80.0 ±2 | 60.0 ±0.5 |
| $L_2$ | 宽平行部分间的距离 | 104 ~ 113① | 106 ~ 120① |
| $L_3$ | 总长度 | ≥150② | ≥150② |
| $b_1$ | 窄部分宽度 | 10.0 ±0.2 | 10.0 ±0.2 |
| $b_2$ | 端部宽度 | 20.0 ±0.2 | 20.0 ±0.2 |
| $h$ | 优选厚度 | 4.0 ±0.2 | 4.0 ±0.2 |
| $r$ | 半径 | 20 ~ 25 | ≥60③ |

① 由 $L_1$、$r$、$b_1$ 和 $b_2$ 获得的结果应在规定的允差范围内。

② 对有些材料柄端长度需要延长（如 $L_3$ = 200mm），以防止在试验夹具内断裂或滑动。

③ $r = [(L_2 - L_1)^2 + (b_2 - b_1)^2]/[4(b_2 - b_1)]$。

如果由于某些原因不能使用 1 型标准试样时，可使用 1BA 型、1BB 型（见图 2-81 和表 2-48），5A 或 5B 型（见图 2-82 和表 2-49）试样。只要将试验速度调整到 GB/T 1040.1—2006 中给定的值，使小试样的标称应变速率最接近标准尺寸试样的应变速率。标称应变速率为试验速度与夹具初始距离的商。当需要测量模量时，试验速度应为 1mm/min。用小试样测量模量在技术上可能是困难的，因为标距长度小，试验时间短。由小试样获得的结果与用 1 型标准试样获得的结果不可比较。

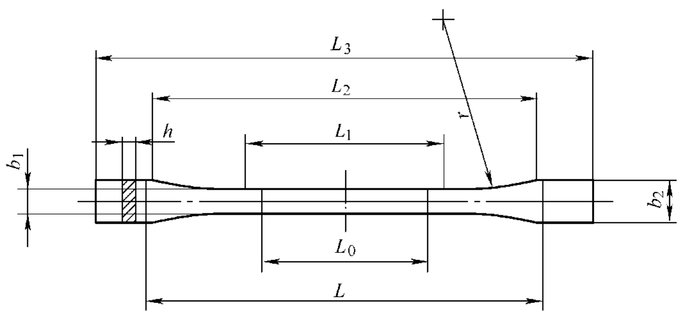



图 2-81　1BA 型和 1BB 型试样的形状

**表 2-48　1BA 型和 1BB 型试样的尺寸**　　（单位：mm）

| 符号 | 名　称 | 1BA 型 | 1BB 型 |
|---|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | $L_{2\,0}^{\,+2}$ | $L_{2\,0}^{\,+1}$ |
| $L_0$ | 标距 | 25.0 ±0.5 | 10.0 ±0.5 |
| $L_1$ | 窄平行部分的长度 | 30.0 ±0.5 | 12.0 ±0.5 |
| $L_2$ | 宽平行部分间的距离 | 58 ±2 | 23 ±2 |
| $L_3$ | 总长度 | ≥75 | ≥30 |
| $b_1$ | 窄部分宽度 | 5.0 ±0.5 | 2.0 ±0.2 |
| $b_2$ | 端部宽度 | 10.0 ±0.2 | 4.0 ±0.2 |
| $h$ | 优选厚度 | ≥2 | ≥2 |
| $r$ | 半径 | ≥30 | ≥12 |

注：除厚度外，1BA 型和 1BB 型试样分别比照 1B 型试样按 1:2 和 1:5 比例系数缩小。

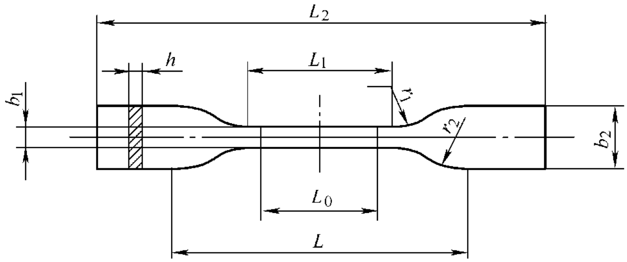



图 2-82　5A 型和 5B 型试样的形状

**表 2-49　5A 型和 5B 型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符　　号 | 名　　称 | 5A 型 | 5B 型 |
|---|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 50 ±2 | 20 ±2 |
| $L_0$ | 标距 | 20. 0 ±0. 5 | 10. 0 ±0. 2 |
| $L_1$ | 窄平行部分的长度 | 25. 0 ±1 | 12. 0 ±0. 5 |
| $L_2$ | 总长度 | ≥75 | ≥35 |
| $b_1$ | 窄部分宽度 | 4. 0 ±0. 1 | 2. 0 ±0. 1 |
| $b_2$ | 端部宽度 | 12. 5 ±1 | 6. 0 ±0. 5 |
| $h$ | 优选厚度 | ≥2 | ≥1 |
| $r_1$ | 小半径 | 8 ±0. 5 | 3 ±0. 1 |
| $r_2$ | 大半径 | 12. 5 ±1 | 3 ±0. 1 |

（2）试样材料　试样适用于下列材料：

1）硬质和半硬质的热塑性模塑、挤塑和铸塑材料，除未填充类型外，还包括例如用短纤维、细棒、小薄片或细粒料填充和增强的复合材料，但不包括纺织纤维增强的复合材料。

2）硬质和半硬质热固性模塑和铸塑材料，包括填充和增强的复合材料，但纺织纤维增强材料除外。

3）热致液晶聚合物。

试样材料不适用于纺织纤维增强的复合材料、硬质微孔材料或含有微孔材料夹层结构的材料。

（3）试样制备　应按照相关材料规范制备试样，当无规范或无其他规定时，应按 GB/T 17037. 1—1997 以适宜的方法从材料直接压塑或注塑制备试样。

试样所有表面应无可见裂痕、划痕或其他缺陷。如果模塑试样存在飞边应去掉，注意不要损伤模塑表面。

由制件机加工制备试样时应取平面或曲率最小的区域。除非确实需要，对于增强塑料试样不宜使用机加工来减少厚度，表面经过机加工的试样与未经机加工的试样试验结果不能相互比较。

（4）标线　如果使用光学引伸计，特别是对于薄片和薄膜，应在试样上标出规定的标线。标线与试样的中点距离应大致相等，两标线间距离的测量精度应达到 1% 或更优。

标线不能刻划、冲刻或压印在试样上，以免损坏受试材料，应采用对受试材料无影响的标线，而且所画的相互平行的每条标线要尽量窄。

（5）检查　试样应无扭曲，相邻的平面间应相互垂直。表面和边缘应无划痕、空洞、凹陷和飞边。试样可与直尺、直角尺、平板比对，应用目测并用螺旋测微器检查是否符合这些要求。经检查发现试样有一项或几项不合要求时，应舍弃或在试验前机加工至合适的尺寸和形状。

（6）试样数量　按下面的相关规定：

1）每个受试方向和每项性能（拉伸模量、拉伸强度等）的试验，试样数量不少于5个。如果需要精密度更高的平均值，试样数量可多于5个，可用置信区间（95%概率）估算得出。

2）应废弃在肩部断裂或塑性变形扩展到整个肩宽的哑铃形试样，并另取试样重新试验。

3）当试样在夹具内出现滑移或在距任一夹具10mm以内断裂，或由于明显缺陷导致过早破坏时，由此试样得到的数据不应用来分析结果，应另取试样重新试验。由于这些数据的变化是受试材料性能变化的函数，因此，无论数据怎样变化，不应随意舍弃数据。如果多数的破坏出现在可接受破坏判据以外时，可用统计学分析得出数据。但一般认为最后的试验结果可能是过低的。在这种情况下，最好用哑铃形试样重复试验，以减少不可接受试验结果的可能性。

**2. 薄膜和薄片试样**

（1）形状和尺寸　应优先选用宽度为10～25mm、长度不小于150mm的长条试样（即2型试样，见图2-83和表2-50），试样中部应有间隔为50mm的两条平行标线。

有些薄膜材料断裂时有很高的伸长量，可能超过试验机的行程限度，此时，允许把夹具间的初始距离减少到50mm。

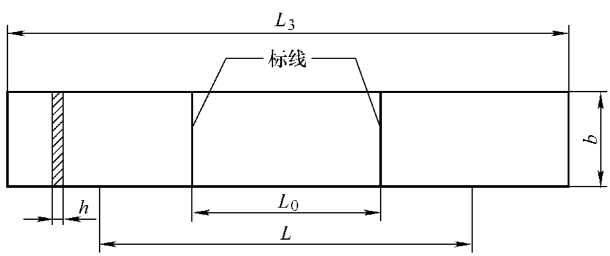



图2-83　2型试样

**表2-50　2型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符　号 | 名　称 | 尺　寸 |
|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 100±5 |
| $L_0$ | 标距 | 50.0±0.5 |
| $L_3$ | 总长度 | ≥150 |
| $b$ | 宽度 | 10～25 |
| $h$ | 优选厚度 | ≤1 |

当受试材料规范或常规质量控制试验有规定时，可使用如图 2-84、图 2-85 和图 2-86 中所示形状和尺寸的 5 型、4 型和 1B 型哑铃形试样。

5 型试样（见图 2-84 和表 2-51）推荐用于断裂应变很高的薄膜和薄片。

4 型试样（见图 2-85 和表 2-52）推荐用于其他类型的软质热塑性片材。

1B 型试样推荐用于硬质片材。

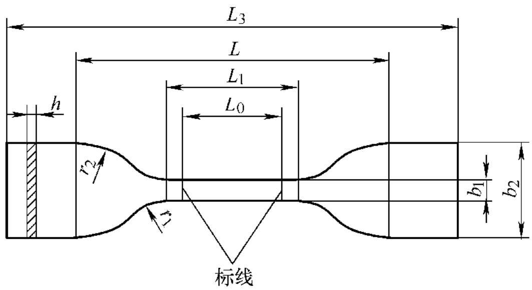



图 2-84　5 型试样

**表 2-51　5 型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符　号 | 名　称 | 尺　寸 |
|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 80 ± 5 |
| $L_0$ | 标距 | 25. 0 ± 0. 25 |
| $L_1$ | 窄平行部分的长度 | 33. 0 ± 2 |
| $L_3$ | 总长度 | ≥115 |
| $b_1$ | 窄部分宽度 | 6. 0 ± 0. 4 |
| $b_2$ | 端部宽度 | 25 ± 1 |
| $h$ | 优选厚度 | ≤1 |
| $r_1$ | 小半径 | 14 ± 1 |
| $r_2$ | 大半径 | 25 ± 2 |

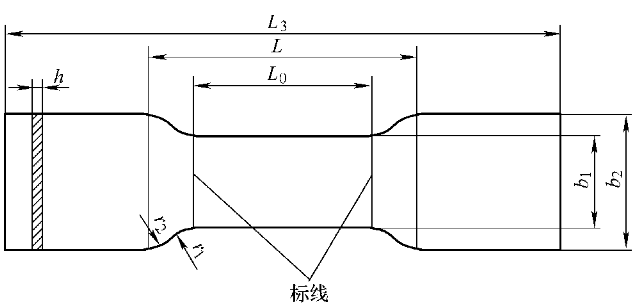



图 2-85　4 型试样

**表 2-52　4 型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符　号 | 名　称 | 尺　寸 |
|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 98 |
| $L_0$ | 标距 | 50. 0 ± 0. 5 |
| $L_3$ | 总长度 | 152 |

（续）

| 符　号 | 名　称 | 尺　寸 |
|---|---|---|
| $b_1$ | 窄部分宽度 | 25.4 ±0.1 |
| $b_2$ | 端部宽度 | 38 |
| $h$ | 优选厚度 | ≤1 |
| $r_1$ | 小半径 | 22 |
| $r_2$ | 大半径 | 25.4 |

（2）试样材料　试样材料适用于厚度小于1mm的塑料薄膜或薄片，不适用于泡沫塑料和纺织纤维增强塑料。

（3）试样制备　应使用切割或冲切方法制备2型试样，以使试样边缘光滑且无缺口。推荐使用低倍数放大镜检查有无缺陷。应使用剃刀刀片、适宜的切纸刀、手术刀或其他工具切割试样，使其宽度合适、边缘平整、两边平行且无可见缺陷。应通过定期打磨以保持冲刀锋利，并应使用适当的衬垫材料，以确保刀刃边缘平整。

应使用冲刀冲切制备1B型、4型、5型试样，并应使用适合的衬垫材料，以确保冲切的试样边缘整齐。应通过定期打磨保持冲刀锋利，并使用低倍数放大镜检查试样边缘，以确保无缺口。

（4）标线　如果使用光学引伸计，特别是对于薄片和薄膜，应在试样上标出规定的标线，标线与试样的中点距离应大致相等，两标线间距离的测量精度应达到1%或更优。

标线不能刻划、冲刻或压印在试样上，以免损坏受试材料，应采用对受试材料无影响的标线，而且所画的相互平行的每条标线要尽量窄。

用来画标线的装置应有两个平行、光滑、平整的刀口，刀刃宽度为0.05～0.10mm，且斜削角不超过15°。也可使用对受试薄膜没有不良影响的反差色强的墨水印章，盖在标记区域。

试样的检查方法及试样数量与模塑和挤塑塑料试样的要求完全相同。

**3. 各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试样**

（1）形状和尺寸　各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试样分为1B型、2型和3型三类。

1）1B型试样用于试验纤维增强热塑性塑料。如果破坏发生在标距线内，1B型试样也可用于纤维增强热固性塑料。1B型试样不应用于多向性连续纤维增强材料。1B型试样的形状如图2-86所示，尺寸如表2-53所示。

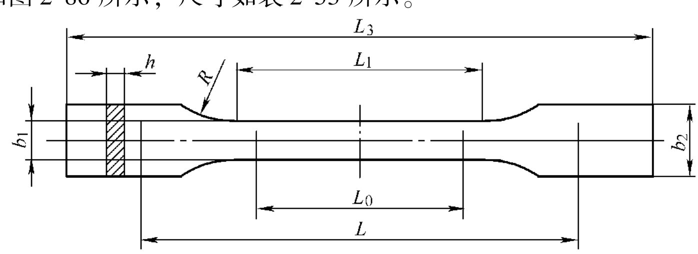



图2-86　1B型试样

表 2-53　1B 型试样的尺寸　（单位：mm）

| 符　　号 | 名　　称 | 尺　　寸 |
|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 115 ±1 |
| $L_0$ | 标距 | 50. 0 ±0. 5 |
| $L_1$ | 窄平行部分的长度 | 60. 0 ±0. 5 |
| $L_3$ | 总长度 | ≥150① |
| $b_1$ | 窄部分宽度 | 10. 0 ±0. 2 |
| $b_2$ | 端部宽度 | 20. 0 ±0. 2 |
| $h$ | 优选厚度 | 2 ~10 |
| $R$ | 半径 | ≥60② |

① 对某些材料，端柄长度可能需要延长（如可使 $L_3$ =200mm），以防止试样在夹具内破坏或滑动。
② 厚度为 4mm 的试样，与模塑和挤塑塑料试样相同。

2）2 型试样（不带端柄的矩形试样）和 3 型试样（带有粘接端柄的矩形试样）用来试验纤维增强热固性和热塑性塑料。未粘接端柄的试样一般作为 2 型试样。

2 型及 3 型试样的优选宽度为 25mm，如果由于使用了特殊的增强材料，使其拉伸强度变得不高时，也可以使用宽度为 50mm 或更大的试样。2 型和 3 型试样的厚度应为 2 ~10mm。对于压塑材料，各类试样两端片之间不应有厚度偏离平均值超过 2% 的点。

为了确定使用 2 型还是 3 型试样，应首先使用 2 型试样进行试验。如果无法试验或结果不令人满意，例如试样在夹具中打滑或在夹具中破坏，则使用 3 型试样。

2 型试样和 3 型试样的形状如图 2-87 所示，尺寸如表 2-54 所示。

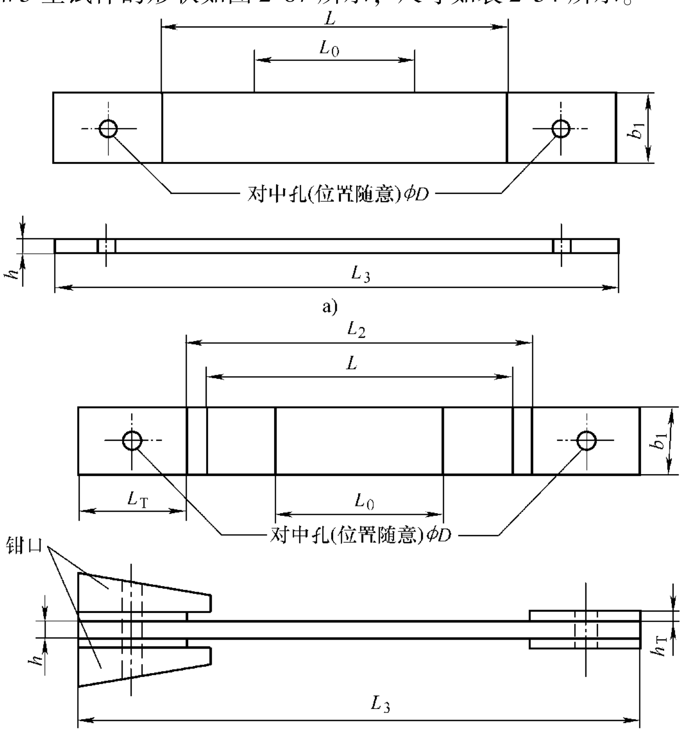



图 2-87　2 型试样和 3 型试样的形状

a）2 型试样　b）3 型试样

表 2-54　2 型和 3 型试样的尺寸　（单位：mm）

| 符号 | 名　　称 | 2 型 | 3 型 |
|---|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 150 ± 1 | 136（标称） |
| $L_0$ | 标距 | 50.0 ± 1 | 50.0 ± 1 |
| $L_2$ | 两端柄间的距离 | — | 150 ± 1 |
| $L_3$ | 总长度 | ≥250 | ≥250 |
| $L_T$ | 端柄长度 | — | ≥50 |
| $b_1$ | 宽度 | 20.0 ± 0.5 或 50.0 ± 0.5 | 20.0 ± 0.5 或 50.0 ± 0.5 |
| $h$ | 厚度 | 2 ~ 10 | 2 ~ 10 |
| $h_T$ | 端柄厚度 | — | 1 ~ 3 |
| $D$ | 对中孔直径 | 3 ± 0.25 | 3 ± 0.25 |

（2）试样材料　试样适用于下列材料：

1）混入非单向增强材料的纤维增强热固性和热塑性复合材料，所用的非单向增强材料有毡片、机织物、无捻粗纱织物、短切原丝及上述增强材料的组合物、混杂纤维、无捻粗纱、短切或磨碎纤维或预浸渍材料（预浸料）等（对于直接注塑试样，采用 1A 型试样）。

2）带有单向增强材料的上述材料复合制品和用单向层压片材构成的多向增强材料，所提供的层压片材应是匀称的。

3）由以上材料制作成品。涉及的增强纤维包括玻璃纤维、碳纤维、聚芳酰胺纤维或其他类似纤维。

（3）试样坐标轴　通常根据与材料结构或生产工艺有关的特征来规定“1”方向（见图 2-88），把与“1”方向垂直的方向规定为“2”方向。“1”方向又称为 0°方向或纵向，“2”方向又称为 90°方向或横向。

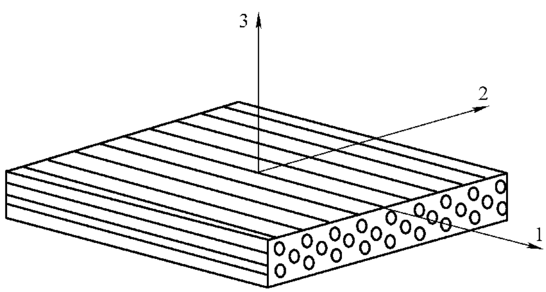



图 2-88　各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试样的坐标轴

1—0°方向　2—90°方向　3—与 1、2 相成的平面垂直方向

（4）试样制备　当要求从最终产品制备试样时（如为了在生产过程中或交货时进行质量控制），则应从平面部分制取试样。

对于机加工制备试样，在任何情况下，都要采取以下措施：①避免造成试样中热量大量累积（建议使用冷却剂），如果使用液体冷却剂，在机加工后，应立即擦干试样；②检查试样所有切削表面，应没有由机加工造成的缺陷。

对于带有粘接端柄试样，试样的两端应进行增强，最好使用与试样长轴成 45°角的

纤维多层交叉层压或玻纤织物/树脂层压的方式制成端柄，柄厚应为 1 ~ 3mm，柄角为 90°（即不是渐缩的）。允许选用其他的柄形装置，但使用前应得到证明其强度至少能与推荐的端柄相等。可供选择的端柄包括由受试材料制成的端柄、机械紧固端柄及由粗糙材料制造的非粘结端柄（例如金刚砂纸、普通砂纸及使用粗糙的夹具表面等）。

从受试材料上切取一块片材，该片材具有指定试样的长度，而其宽度应与切取所需的试样数目相适应。在该片材上标识材料的“1”方向。切取制作端柄所需长度和宽度的矩形条。按下述步骤把上述矩形条粘贴到制好的试样片材上：

1）如果需要，对即将进行粘贴的所有表面都用细砂纸打磨处理或使用合适砂子进行喷砂处理。

2）消除上述表面灰尘并使用合适溶剂清洁表面。

3）严格按照粘合剂使用说明，用高韧性粘合剂把矩形条沿片材两端粘贴到片材上，矩形条间应相互平行，且垂直于试样的长度方向，如图 2-89 所示。推荐使用带有薄型载体的薄膜粘合剂。该粘合剂的剪切强度应大于 30MPa，并希望所使用的粘合剂是柔韧的，其断裂应变应大于受试材料。

4）按粘合剂使用说明推荐的温度、压力和保持时间进行粘接。

5）把上述片材切割成试样，切割时应把构成端柄的矩形条与片材结合在一起作为一个整体切割。

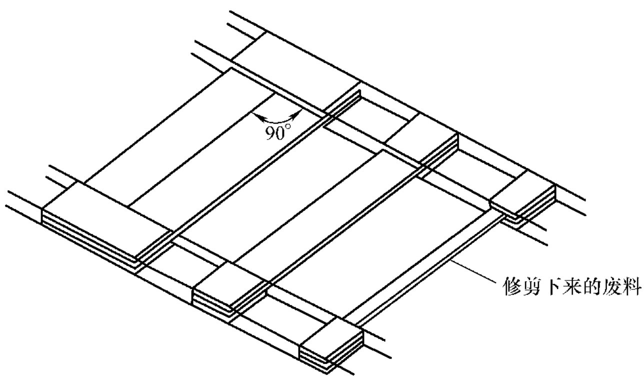



图 2-89　制备试样

试样的标线、检查方法及试样数量与模塑和挤塑塑料试样的要求完全相同。

**4. 单向纤维增强复合材料试样**

（1）形状和尺寸　单向纤维增强复合材料试样有两种 A 型（纵向）和 B 型（横向），取决于与纤维方向相关的试验取向。A 型试样的宽度应为 15mm ± 0. 5mm，总长度为 250mm，厚度为 1mm ± 0. 2mm，单个试样的相对边应互相平行至 0. 2mm 以内。B 型试样的宽度应为 25mm ± 0. 5mm，总长度为 250mm，厚度为 2mm ± 0. 2mm，单个试样的相对边应互相平行至 0. 2mm 以内。对于按照 ISO 9291 纤维缠绕法板材制备的 B 型试样，可允许其长度缩短至 200mm。

单向纤维增强复合材料试样的形状如图 2-90 所示，尺寸如表 2-55 所示。

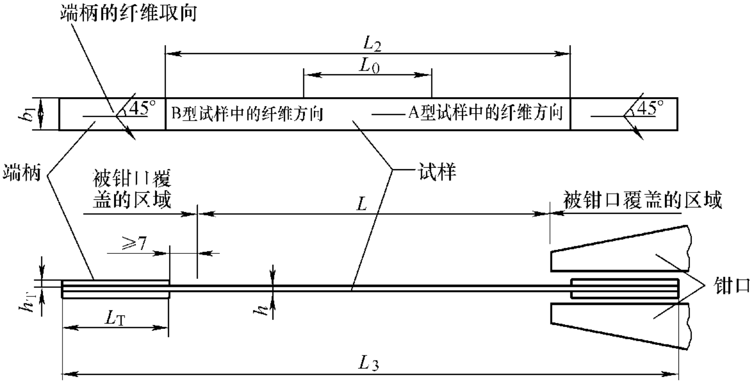



图 2-90　单向纤维增强复合材料试样

**表 2-55　单向纤维增强复合材料试样的尺寸**　　（单位：mm）

| 符号 | 名称 | A 型 | B 型 |
|---|---|---|---|
| $L$ | 夹具间的初始距离 | 136 | 136 |
| $L_0$ | 标距 | 50.0 ±1 | 50.0 ±1 |
| $L_2$ | 两端柄间的距离 | 150 ±1 | 150 ±1 |
| $L_3$ | 总长度 | 250 | 250① |
| $L_T$ | 端柄长度 | ≥50 | ≥50① |
| $b_1$ | 宽度 | 15.0 ±0.5 | 25.0 ±0.5 |
| $h$ | 厚度 | 1 ±0.2 | 2 ±0.2 |
| $h_T$ | 端柄厚度 | 0.5 ~2 | 0.5 ~2 |

① 对于按 ISO 9291 纤维缠绕板所制得的试样，容许试样总长度为 200mm，端柄长度为 25mm。

（2）试样材料　试样材料为用热塑性材料或热固性材料制成的复合材料，包括预浸渍材料（预浸料）。涉及的增强材料包括碳纤维、玻璃纤维、聚芳酰胺纤维或其他类似纤维。涉及的增强材料几何形状，包括单向（即完全成一条直线的）纤维、无捻粗纱，以及单向织物和窄带织物等。不适用于由几种单向层压板在不同角度下复合成的多向复合材料。

（3）试样坐标轴　与各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试样的坐标轴完全相同。

（4）试样制备　对于模塑和层压材料，应先制备一块试板，从该试板上切取单个或成组试样。其他制备试样的方法与各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试样的制备方法完全相同。

## 2.16.2　试验设备

**1. 试验机**

试验机应符合 GB/T 17200 的要求，能达到表 2-56 所规定的试验速度（在试验过程中，试验机夹具的分离速度，单位为 mm/min）。

表 2-56　推荐的试验速度

| 速度/(mm/min) | 允差(%) | 速度/(mm/min) | 允差(%) |
|---|---|---|---|
| 1 | ±20① | 50 | ±10 |
| 2 | ±20① | 100 | ±10 |
| 5 | ±20 | 200 | ±10 |
| 10 | ±20 | 500 | ±10 |
| 20 | ±10 | | |

① 这些允差均小于 GB/T 17200 所标明的允差。

**2. 夹具**

用于夹持试样的夹具与试验机相连，使试样的长轴与通过夹具中心线的拉力方向重合，例如可通过夹具上的对中销来达到。应尽可能防止被夹持试样相对于夹具滑动，最好使用这种类型夹具：当加到试样上的拉力增加时，能保持或增加对试样的夹持力，且不会在夹具处引起试样过早破坏。

**3. 负荷指示装置**

负荷指示装置是指应带有能显示试样所承受的总拉伸负荷的装置。该装置在规定的试验速度下应无惯性滞后，指示负荷的准确度至少为实际值的 1%。

**4. 引伸计**

引伸计应符合 GB/T 19200 的规定，应能测量试验过程中任何时刻试样标距的相对变化。该仪器最好（但不是必须）能自动记录这种变化，且在规定的试验速度下应基本上无惯性滞后，并能以相关值的 1% 或更优精度测量标距的变化。这相当于在测量模量时，在 50mm 标距基础上能准确至 ±1μm。

当引伸计连接在试样上时，应小心操作以使试样产生的变形和损坏最小。引伸计和试样之间基本无滑动。

试样也可以装纵向应变规，其精度应为对应值的 1% 或更优。应变规表面处理和粘合剂的选择应以能显示被试材料的所有性能为宜。

**5. 测量试样宽度和厚度的仪器**

1）对于硬质材料，应使用测微计或等效的仪器测量试样宽度和厚度，其读数精度为 0.02mm 或更优。测量头的尺寸和形状应适合于被测量的试样，不应使试样承受压力而明显改变所测量的尺寸。

2）对于软材料，应使用读数精度为 0.02mm 或更优的度盘式测微器来测量试样厚度，其压头应带有圆形平面，同时在测量时能施加 20kPa ±3kPa 的压力。

**6. 特殊要求**

（1）薄膜和薄片试验设备的特殊要求　拉伸试验机应能达到表 2-56 中规定的试验速度。通常薄膜和薄片的试验速度为：5mm/min、50mm/min、100mm/min、200mm/min、300mm/min 或 500mm/min。

进行薄膜和薄片试验时，试样不应支承或承受引伸计重量。很薄的薄膜（厚度小于 0.01mm）或凹凸不平的薄膜，应使用 ISO 4591：1992 规定的方法测量厚度，并把薄膜样品的平均厚度作为试样厚度。

（2）各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试验设备的特殊要求　测微计或

等效测量仪器的读数精度应达到0.01mm或更优。如果用在凹凸不平的表面上，仪器应带有尺寸合适、端部为球形的测量头。如果用在平整、光滑的（例如经过机械加工的）表面上，则应带有平面测量头。

前面所述测量软材料的方法此时不适用。

（3）单向纤维增强复合材料试验设备的特殊要求　测微计或等效的仪器读数精度应为0.01mm或更优。如在凹凸不平的表面上使用时，应带有一个尺寸适宜、端部为球形的测量头。如果是在平整光滑的表面（比如是经过机加工过的）上使用，则应带有一个平面测量头。

前面所述测量软材料的方法此时不适用。

应注意确保由夹具施加的压力能刚好保证试样从加载荷至破坏时在夹具中不打滑。夹具压力过大可引起试样破裂，这是由于材料的横向强度较低的缘故。建议使用能保证夹具压力恒定的液压夹具。

如果把应变规粘结到试样上，这种横向应变规的横向效应对各向异性复合材料所引起的误差通常比各向同性的金属材料大得多。应对这种效应进行校正，才能保证泊松比测量的准确性。

## 2.16.3　试验内容及结果表示

**1. 试验环境**

应在与试样状态调节相同环境下进行试验，除非有关方面另有商定，例如在高温或低温下试验。

**2. 试样尺寸**

1）在每个试样中部距离标距每端5mm以内测量宽度 $b$ 和厚度 $h$，宽度 $b$ 精确至0.1mm，厚度 $h$ 精确至0.02mm。

2）记录每个试样宽度和厚度的最大值和最小值，并确保其在相应材料标准的允差范围内。

3）计算每个试样宽度和厚度的算术平均值，以便用于其他计算。

4）对注塑试样，不必测量每个试样的尺寸。每批测量一个试样就足以确定所选试样类型的相应尺寸。使用多型腔模具时，应确保每腔的试样尺寸相同。

5）从片材或薄膜上冲压出来的试样，可认为冲模中间平行部分的平均宽度与试样的对应宽度相等。在周期性的比对验证测量基础上，才可采用这种方法。

**3. 夹持**

将试样放到夹具中，务必使试样的长轴线与试验机的轴线成一条直线。当使用夹具对中销时，为得到准确对中，应在紧固夹具前稍微绷紧试样，然后平稳而牢固地夹紧夹具，以防止试样滑移。

**4. 试样的对中**

各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料试样和单向纤维增强复合材料试样对中时，推荐使用带有应变片的试样在标距中心位置校核拉伸试验机和试样的对中情况，制作该试样的材料与被试材料相同。使用某种装置或方法，以保证该试样用可重复的方式

定位在夹具中。带有应变片试样如图 2-91 所示。把两个应变片（SG1、SG2）粘贴到试样的同一个面上，距试样边缘距离大约为试样宽度的 1/8。把第三个应变片（SG3）粘贴到试样的背面中线与前面的两个应变片中点连线的交点位置上。

把各应变片的输出值与在测量拉伸模量应变范围中点值，即 0.0015，进行比较。用下式分别计算在宽度方向上的弯曲应变（$B_b$）和在厚度方向的弯曲应变（$B_h$），以百分数表示。

$$B_b = \frac{4|\varepsilon_2 - \varepsilon_1|}{3\varepsilon_{av}} \times 100\%$$

$$B_h = \frac{|\varepsilon_{av} - \varepsilon_3|}{\varepsilon_{av}} \times 100\%$$

$\varepsilon_1$、$\varepsilon_2$ 和 $\varepsilon_3$ 分别为应变片 SG1、SG2 和 SG3 所记录的应变值，$\varepsilon_{av}$ 由下式计算：

$$\varepsilon_{av} = \frac{\varepsilon_1}{4} + \frac{\varepsilon_2}{4} + \frac{\varepsilon_3}{2}$$

最后，确保弯曲应变满足下面的不等式给出的条件：

$$B_b + B_h \leqslant 3.0\%$$

为全面检查出不对中的所有可能来源，必须在靠近夹具处使用更多的应变片。在试样的每个侧面夹上一个带有纵向应变输出的引伸计，能检查单独试样在宽度方向上的对中情况。

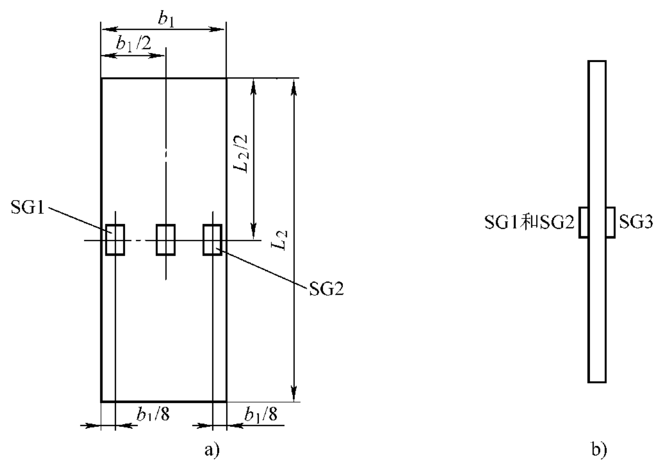



图 2-91　用于对中校核系统应变片（SG1、SG2 和 SG3）的位置

a）主视图　b）侧视图

$L_2$—试样长度（mm）　$b_1$—试样宽度（mm）

**5. 预应力**

试样在试验前应处于基本不受力状态。但在薄膜试样对中时可能产生预应力，特别是较软材料由于夹持压力，也能产生预应力。

在测量模量时，试验初始应力 $\sigma_0$，应满足下式：

$$|\sigma_0| \leqslant 5\times10^{-4}E_t$$

式中 $\sigma_0$——初始应力，单位为 MPa；

$E_t$——拉伸弹性模量（应力差值与对应的应变差值之比），单位为 MPa。

与此相对应的预应变应满足 $\varepsilon_0 \leqslant 0.05\%$。

当测量相关应力时，应满足下式：

$$\sigma_0 \leqslant 10^{-2}\sigma$$

式中 $\sigma$——拉伸应力（在任何给定时刻，在试样标距长度内，每单位原始横截面积上所受的拉伸负荷），单位为 MPa。

**6. 引伸计的安装**

平衡预应力后，将校准过的引伸计安装到试样的标距上并调正，或装上纵向应变规。如果需要，测出初始距离（标距）。如果要测定泊松比，则应在纵轴和横轴方向上同时安装两个伸长或应变测量装置。

用光学方法测量伸长时，应在试样上标出测量标线。

测定拉伸标称应变时，用夹具间移动距离表示试样自由长度的伸长。

**7. 试验速度**

1）根据有关材料的相关规定确定试验速度，如果缺少这方面的资料，可与有关方面根据表 2-56 商定。

2）测定弹性模量、屈服点前的应力/应变性能及测定拉伸强度和最大伸长时，可能需要采用不同的速度。对于每种试验速度，应分别使用单独的试样。

3）测定弹性模量时，选择的试验速度应尽可能使应变速率接近每分钟 1% 标距。

4）测定模塑和挤塑塑料的弹性模量时，1A 型和 1B 型试样的试验速度为 1mm/min。

5）测定各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料性能时：①对于 1B 型试样，常规质量控制时试验速度为 10mm/min，测定最大伸长和拉伸弹性模量时试验速度为 2mm/min；②对于 2 型和 3 型试样，常规质量控制时试验速度为 5mm/min，测定最大伸长和拉伸弹性模量时试验速度为 2mm/min。

6）单向纤维增强复合材料性能时：①对于 A 型试样，其试验速度为 2mm/min；②对于 B 型试样，其试验速度为 1mm/min。

**8. 试验原理**

沿试样纵向主轴恒速拉伸，直到断裂或应力（负荷）或应变（伸长）达到某一预定值，测量在这一过程中试样承受的负荷及其伸长。典型的应力-应变曲线如图 2-92 所示。

**9. 应力计算**

根据试样的原始横截面积按下式计算应力值：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

式中 $\sigma$——拉伸应力，单位为 MPa；

$F$——所测的对应负荷，单位为 N；

$A$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

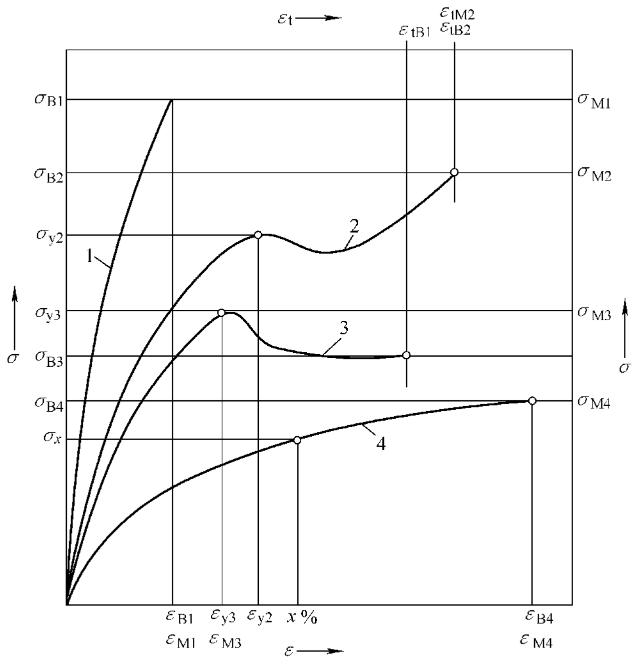



图 2-92 典型的应力-应变曲线

1—脆性材料 2—有屈服点的韧性材料 3—无屈服点的韧性材料 4—仅表示计算弹性模量的两个点

$\sigma$—拉伸应力（在任何给定时刻，在试样标距长度内，每单位原始横截面积上所受的拉伸负荷，单位为 MPa）

$\sigma_y$—拉伸屈服应力（出现应力不增加而应变增加时的最初应力，该应力值可能小于能达到的最大应力，单位为 MPa）

$\sigma_B$—拉伸断裂应力（试样断裂时的拉伸应力，单位为 MPa）

$\sigma_M$—拉伸强度（在拉伸试验过程中，试样承受的最大拉伸应力，单位为 MPa）

$\sigma_x$—$x$% 应变拉伸应力（在应变达到规定值 $x$% 时的应力，可用于应力/应变曲线上无明显屈服点的情况，在任何情况下，$x$ 都应低于拉伸强度所对应的应变，单位为 MPa）

$\varepsilon$—拉伸应变（原始标距单位长度的增量，用无量纲的比值或百分数表示，它适用于屈服点以前的应变）

$\varepsilon_y$—屈服拉伸应变（在屈服应力时的拉伸应变，用无量纲的比值或百分数表示）

$\varepsilon_B$—断裂拉伸应变（试样未发生屈服而断裂时与断裂应力相对应的拉伸应变，用无量纲的比值或百分数表示）

$\varepsilon_M$—拉伸强度拉伸应变（未出现屈服点或强度就在屈服点时，与拉伸强度相对应的拉伸应变，用无量纲的比值或百分数表示）

$\varepsilon_t$—拉伸标称应变（两夹具之间距离单位原始长度的增量，用无量纲的比值或百分数表示）

$\varepsilon_{tB}$—断裂标称应变（试样在屈服后断裂时与拉伸断裂应力相对应的拉伸标称应变，用无量纲的比值或百分数表示）

$\varepsilon_{tM}$—拉伸强度标称应变（拉伸强度出现在屈服之后时与拉伸强度相对应的拉伸标称应变，用无量纲的比值或百分数表示）

注：图中各符号下标中的数字表示曲线序号。

**10. 应变计算**

根据标距由下式计算应变值：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon$——应变（%）；

$L_0$——试样的标距，单位为 mm；

$\Delta L_0$——试样标记间长度的增量，单位为 mm。

可根据夹具间的初始距离由下式计算拉伸标称应变值：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon_t$——拉伸标称应变（%）；

$L$——夹具间的初始距离，单位为 mm；

$\Delta L$——夹具间距离的增量，单位为 mm。

**11. 模量计算**

根据两个规定的应变值按下式计算拉伸弹性模量：

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

式中　$E_t$——拉伸弹性模量，单位为 MPa；

$\sigma_1$——应变值 $\varepsilon_1 = 0.0005$ 时测量的应力，单位为 MPa；

$\sigma_2$——应变值 $\varepsilon_2 = 0.0025$ 时测量的应力，单位为 MPa。

模量计算如图 2-93 所示。

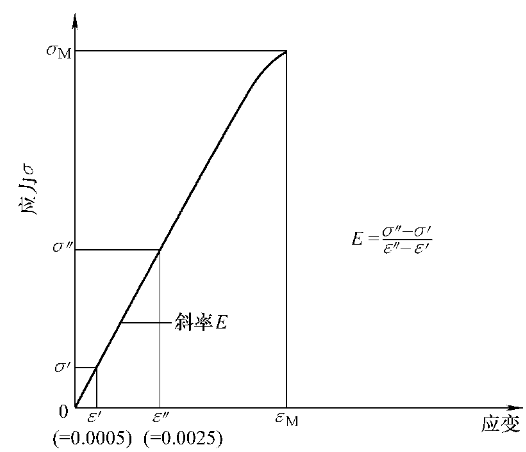



图 2-93　模量计算

**12. 泊松比**

根据两个相互垂直方向的应变值按下式计算泊松比：

$$\mu_n = -\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}$$

式中　$\mu_n$——泊松比，以法向 $n = b$（宽度）或 $h$（厚度）上的无量纲比值表示；

$\varepsilon$——纵向应变；

$\varepsilon_n$——$n = b$（宽度）或 $h$（厚度）时的法向应变。

**13. 特殊规定**

对于薄膜和薄片的试验，不计算模量和泊松比。

**14. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，应力和模量保留 3 位有效数字，应变和泊松比保留 2 位有效数字。

## 2.17　塑料拉伸蠕变试验

塑料拉伸蠕变试验按照 GB/T 11546.1—2008《塑料　蠕变性能的测定　第 1 部分：拉伸蠕变》进行。

### 2.17.1　试样

塑料拉伸蠕变试验用试样与模塑和挤塑塑料试样完全相同。

### 2.17.2　试验设备

**1. 试验机**

试验机应符合 GB/T 17200 的要求。

**2. 夹具**

夹具应尽可能保证加载轴线与试样纵轴方向一致。确保试样只承受单一应力，可认为试样受载部分所受应力均匀分布在垂直于加载方向的横截面上。

建议使用加载前就能将试样对中固定的夹具。升高载荷时，试样和夹具不允许有任何位移，自锁夹具不适合本试验。

**3. 加载系统**

加载系统应保证能平稳施加载荷，不产生瞬间过载，并且施加的载荷在所需载荷的 ±1% 以内。在蠕变破断试验中，应采取措施防止试样破断时产生的振动传递到相邻的加载系统。加载机构应能施加快速、平稳和重复性载荷。

**4. 伸长测量装置**

伸长测量装置由能够测量载荷下试样标距伸长量或夹具间距离伸长量的非接触式或接触式装置构成，此装置不应通过力学效应（如不应有的变形、缺口）、其他物理效应（如加热试样）或化学效应对试样性能产生影响。

使用非接触式（光学）装置测量应变时，应使试样纵轴垂直于测量装置的光轴。为测定试样长度伸长，应使用引伸计记录夹具间距离变化。伸长测量装置的精确度应在 ±0.01mm 以内。

对于蠕变破断试验，建议使用按测高仪原理制成的非接触式光学系统测量伸长。最好能自动指示试样破断时间。应采用刻有标记的（金属）夹子或者惰性耐热漆在试样上标出标距。

只有受试材料允许使用电阻应变计所用的粘合剂时，以及蠕变持续时间较短时，电阻应变计才能使用。

**5. 计时器**

计时器应精确至 0.1%。

**6. 测微计**

测量试样厚度和宽度，测微计应精确至 0.01mm 或更小。

## 2.17.3　试验内容及结果表示

**1. 状态调节和试验环境**

按照材料标准的规定对试样进行状态调节。若材料标准中未规定，且相关方未协商一致，应使用 GB/T 2918 中最适宜的一组状态调节条件。

蠕变性能不仅受试样的热历史影响，而且受状态调节时的温度和湿度影响。如果试样未达到湿度平衡，蠕变将会受到影响。当试样过于干燥，由于吸水会产生正应变；而当试样过于潮湿，由于脱水会产生负应变。

除非相关方协商一致，如在高温或低温下试验，则应在与状态调节相同的环境下进行试验。应保证试验时间内温度偏差在 ±2℃以内。

**2. 测量试样尺寸**

按 GB/T 1040.1—2006 中规定测量状态调节后的试样尺寸。

**3. 安装试样**

将状态调节后并已测量尺寸的试样安装在夹具上，并按要求安装伸长测量装置。

**4. 选择应力值**

选择与材料预期应用相当的应力值，并按规定的公式计算施加在试样上的载荷。若规定初始应变值，应力值可以用材料的弹性模量计算。

**5. 加载步骤**

（1）预加载　如为消除试验中传动装置的齿间偏移，可在增加试验负荷前向试样施加预载荷，但应保证预加载不对试验结果产生影响。夹好试样后，待温度和相对湿度平衡时才可预加载，再测量标距。保证预加载过程中预载荷不变。

（2）加载　向试样平稳加载，加载过程应在 1～5s 内完成。某种材料的一系列试验应使用相同的加载速度。计算总载荷（包括预载荷）作为试验载荷。

**6. 测量伸长**

记录试样加满载荷点作为 $t=0$ 点，若伸长测量不是自动和（或）连续记录的，则要求按下列时间间隔测量应变：

1）1min、3min、6min、12min、30min。

2）1h、2h、5h、10h、20h、50h、100h、200h、500h、1000h 等。

如果认为时间点太宽，应提高读数频率。

**7. 测量时间**

测量每个蠕变试验的总时间，准确至 ±0.1% 或 ±2s 以内。

**8. 控制温度和湿度**

若温度和相对湿度不是自动记录的，开始试验时应记录，最初一天至少测三次。当在规定时间内试验条件是稳定的，可以不再频繁检查温度和相对湿度（至少每天一次）。

**9. 测量蠕变恢复率**

试验超过预定时间而试样不破断，应迅速平稳卸去载荷。使用与蠕变测量中相同的时间间隔测量恢复率。

**10. 计算法**

（1）拉伸蠕变模量　拉伸蠕变模量 $E_t$ 是指初始应力与拉伸蠕变应力之比，按下式计算：

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon_t} = \frac{FL_0}{A(\Delta L)_t}$$

式中　$E_t$——拉伸蠕变模量，单位为 MPa；

$F$——载荷，单位为 N；

$L_0$——初始标距，单位为 mm；

$A$——试样初始横截面积，单位为 $mm^2$；

$(\Delta L)_t$——时间 $t$ 时的伸长，单位为 mm；

$\sigma$——初始应力，单位为 MPa；

$\varepsilon_t$——拉伸蠕变应变。

（2）标称拉伸蠕变模量　标称拉伸蠕变模量 $E_t^*$ 是指蠕变试验中任一给定时刻由于施加载荷产生的标称伸长与夹具间初始距离之比，按下式计算：

$$E_t^* = \frac{\sigma}{\varepsilon_t^*} = \frac{FL_0^*}{A(\Delta L^*)_t}$$

式中　$E_t^*$——标称拉伸蠕变模量，单位为 MPa；

$F$——载荷，单位为 N；

$L_0^*$——夹具间初始距离，单位为 mm；

$A$——试样初始横截面积，单位为 $mm^2$；

$(\Delta L^*)_t$——时间 $t$ 时的标称伸长，单位 mm；

$\sigma$——初始应力，单位为 MPa；

$\varepsilon_t^*$——标称拉伸蠕变应变。

**11. 图解法**

（1）蠕变曲线　如果试验是在不同温度下进行的，那么原始数据将按每一温度表示为一系列拉伸蠕变应变对时间对数的蠕变曲线，每条曲线代表所用的某一初始应力，如图 2-94 所示。

（2）蠕变模量-时间曲线　对每一个所用的初始应力，可画出按计算法计算出的拉伸蠕变模量对时间对数的曲线（见图 2-95），如果试验是在不同温度下进行的，对每一温度绘出一组曲线。

（3）等时应力-应变曲线　等时应力-应变曲线是施加试验载荷后，在某规定时刻直角坐标中应力对蠕变应变的曲线。通常绘制载荷下 1h、10h、100h、1000h 和 10000h 几条曲线。由于每一蠕变试验在每一曲线上只绘出一个点，因此有必要在至少三个不同的应力下进行试验，以得到等时曲线。

要从图 2-96 所示的一系列蠕变曲线上得到负荷下某一特定时间（如 10h）的等时应力-应变曲线，可从每一蠕变曲线上读出 10h 时的应变，然后在直角坐标中标出对应于应力值（$y$ 轴）的应变值（$x$ 轴）。对其他时间重复这些步骤以得到一系列等时曲线，

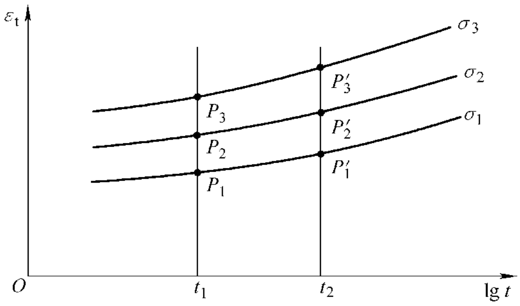



图 2-94　蠕变曲线

注：$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$。

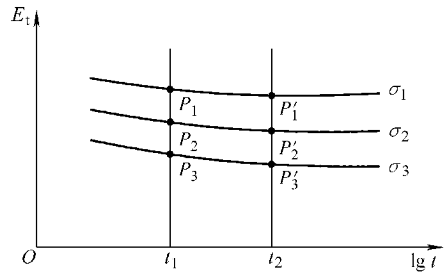



图 2-95　蠕变模量-时间曲线

注：$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$。

如图 2-96 所示。

如果试验是在不同温度下进行的，对每一温度绘出一组曲线。

（4）蠕变破断曲线　蠕变破断曲线可预测任何应力下发生破断的时间。这可以绘制成应力对时间对数曲线（见图 2-97）或应力对数对时间对数曲线。

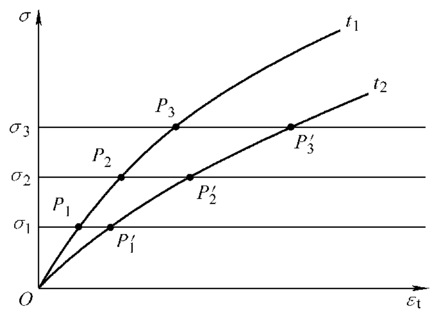



图 2-96　等时应力-应变曲线

注：$t_1 < t_2$。

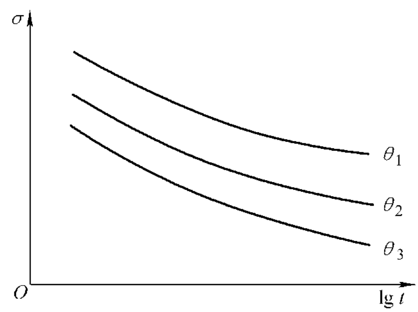



图 2-97　蠕变破裂曲线

$\theta$—温度　$t$—破断时间

注：$\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$。

## 2.17.4　物理老化对聚合物蠕变的影响

**1. 概述**

低温时聚合物分子运动较慢，其松弛时间往往长于该温度下聚合物的存放时间，而在高温条件下，聚合物分子运动较快，松弛时间会明显缩短。因此，聚合物从高温降至低温的过程中会发生物理老化，即在一个较长时间范围内，聚合物结构会相应于温度的降低而发生演变，如分子形态重构、分子有序化堆砌等，直到聚合物结构达到低温存放条件下的平衡态。在上述物理老化过程中，聚合物分子运动能力随温度降低而逐步减弱，即使当温度恒定于低温存放条件时，聚合物分子运动能力还会进一步减弱。因此，在一定应力下聚合物的蠕变形变会依赖于其物理老化过程，且物理老化越充分，蠕变

越慢。

图 2-98 所示为不同物理老化程度聚氯乙烯（PVC）试样的蠕变曲线，其中全部 PVC 试样均在施加载荷前由 85℃（接近玻璃化转变温度 $T_g$）迅速降温至 23℃并保温一定时间 $t_e$，各试样的物理老化程度即用 $t_e$ 描述。由图 2-98 可见，PVC 试样在低温保存时间 $t_e$ 越长，其蠕变曲线沿时间轴向长蠕变时间方向的偏移越大。

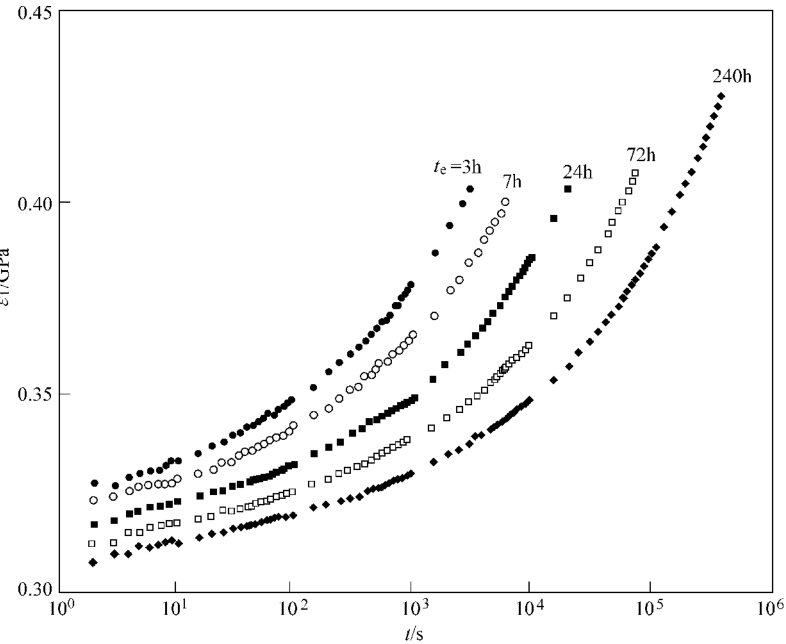



图 2-98　由 85℃迅速降温至 23℃并恒温 $t_e$ 的 PVC 物理老化试样的蠕变曲线

**2. 高温蠕变**

若将聚合物在低温条件下存放一定时间，然后再升高温度测定其蠕变行为，则物理老化对蠕变行为的影响会更加复杂。因为聚合物在低温存放过程中发生的物理老化，在升温至测试温度的过程中会发生一定程度的逆转，而逆转的程度取决于升温幅度的大小和升温过程中所发生的物理老化行为。当该升温过程中聚合物试样的表观（有效）物理老化程度降低时，高温条件会再度激活聚合物的物理老化过程。与聚合物在低温存放时发生的物理老化过程一样，该再度激活的物理老化过程所持续时间的长短，取决于所采用的测试条件。基于温度升高可引起上述聚合物物理老化状态的变化，在高于存放温度的测试温度下，聚合物的蠕变行为依赖于试样在施加载荷前于测试温度下停留时间的长短。

上述聚合物的热历史所产生对聚合物蠕变行为的影响如图 2-99 和图 2-100 所示。图 2-99 中，各试样被加热至试验温度 44℃前，在 23℃下存放时间 $t_{e1}$ 均为 200h，升温至 44℃后保温不同时间 $t_{e2}$，施加载荷并测定其蠕变曲线。结果发现，即便试样在环境温度下经过相对较长的存放时间 $t_{e1}$，其蠕变行为仍强烈依赖于测试温度下的保温时间 $t_{e2}$。

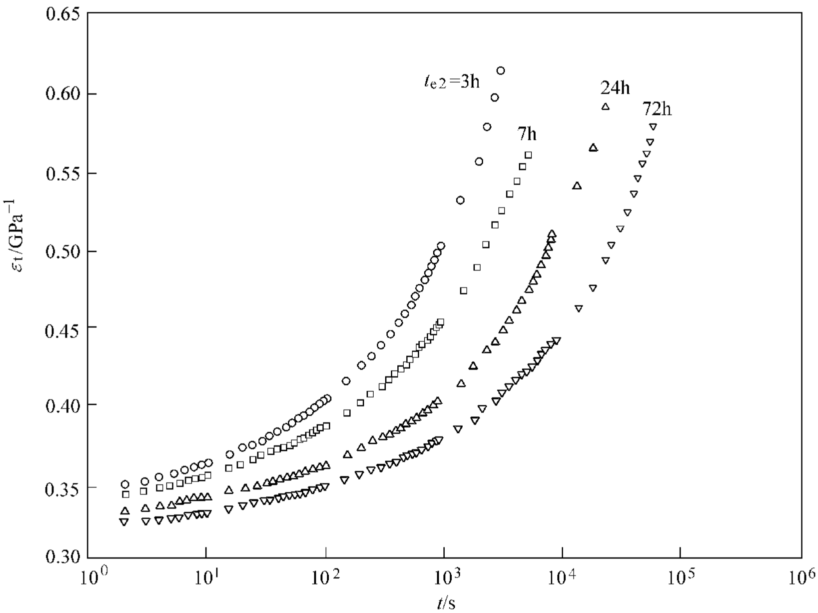



图 2-99　由 23℃加热至 44℃并保温不同时间 $t_{e2}$的 PVC 试样蠕变曲线

注：试样加热前已在 23℃下存放 200h。

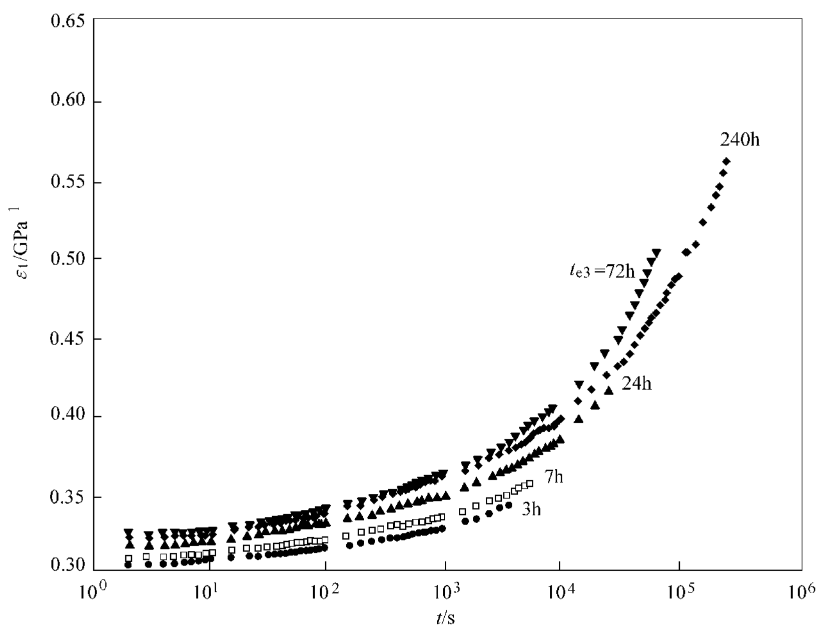



图 2-100　由 23℃加热至 44℃并保温不同时间 $t_{e2}$的 PVC 试样蠕变曲线

注：试样加热前已在 23℃下存放 1a。

图 2-100 中，除了聚合物试样在 23℃下的存放时间 $t_{e1}$ 为 1a 以上之外，所采用蠕变曲线的其他测定条件与图 2-99 中相同。随 PVC 试样在测试温度 44℃下保温时间 $t_{e2}$ 的增加，蠕变曲线沿时间轴向较短蠕变时间偏移，这表明试样的老化程度随 $t_{e2}$ 增加逐步降低。这是因为，在加热升温前的低温存放过程中，试样发生物理老化时产生了更大程度上的结构改变。

## 2.18　纤维增强塑料拉伸性能试验

纤维增强塑料拉伸性能试验按照 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》进行。

### 2.18.1　试样

**1. 试样形状和尺寸**

1）测定拉伸应力、拉伸弹性模量、断裂伸长率和应力-应变曲线试样形状和尺寸如图 2-101、图 2-102、表 2-57 和图 2-103 所示。

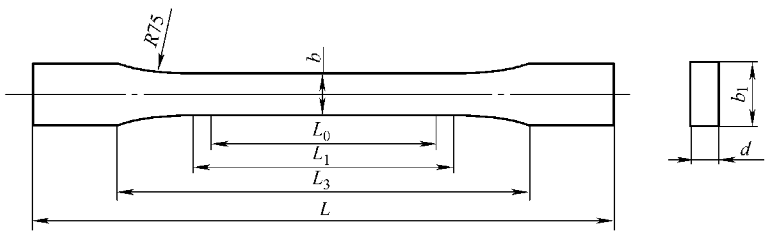



图 2-101　Ⅰ型试样

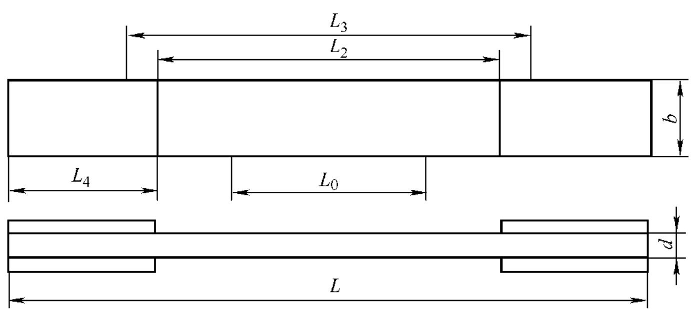



图 2-102　Ⅱ型试样

**表 2-57　Ⅰ型和Ⅱ型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符号 | 名称 | Ⅰ型 | Ⅱ型 |
|---|---|---|---|
| $L$ | 总长(最小) | 180 | 250 |
| $L_0$ | 标距 | 50 ±0. 5 | 100 ±0. 5 |
| $L_1$ | 中间平行段长度 | 55 ±0. 5 | — |

（续）

| 符号 | 名称 | Ⅰ型 | Ⅱ型 |
|---|---|---|---|
| $L_2$ | 端部加强片间距离 | — | 150 ±5 |
| $L_3$ | 夹具间距离 | 115 ±5 | 170 ±5 |
| $L_4$ | 端部加强片长度(最小) | — | 50 |
| $b$ | 中间平行段宽度 | 10 ±0.2 | 25 ±0.5 |
| $b_1$ | 端头宽度 | 20 ±0.5 | — |
| $d$ | 厚度 | 2～10 | 2～10 |

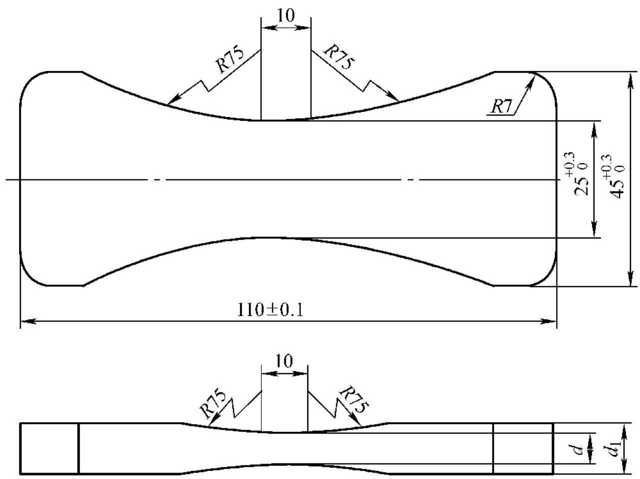



图 2-103　Ⅲ型试样

注：试样厚度为6mm 时，厚度 $d$ 为（6 ±0.5）mm，$d_1$ 为（10 ±0.5）mm，试样厚度为3mm 时，厚度 $d$ 为（3 ±0.2）mm，$d_1$ 为（6 ±0.2）mm。

2）Ⅰ型试样适用于纤维增强热塑性和热固性塑料板材；Ⅱ型试样适用于纤维增强热固性塑料板材。Ⅰ型、Ⅱ型仲裁试样的厚度为4mm。

3）Ⅲ型试样只适用于测定模压短切纤维增强塑料的拉伸强度。其厚度为3mm 和6mm 两种。仲裁试样的厚度为3mm。测定短切纤维增强塑料的其他拉伸性能可以采用Ⅰ型或Ⅱ型试样。

4）测定泊松比试样如图 2-104 所示。

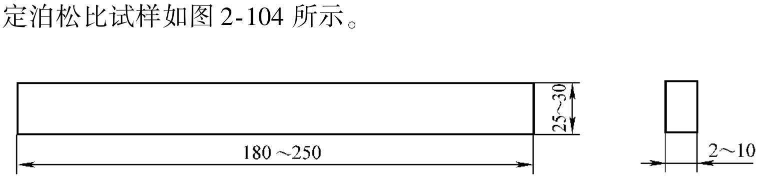



图 2-104　测定泊松比试样

**2. 试样的制备方法**

1）Ⅰ型、Ⅱ型及泊松比试样采用机械加工法制备，Ⅲ型试样采用模塑法制备。

2）Ⅱ型试样加强片采用与试样相同的材料或比试样弹性模量低的材料，厚度为 1～3mm。若采用单根试样粘结时，加强片宽度为试样的宽度；若采用整体粘结后再加工成单根试样时，则宽度要满足所要加工试样数量的要求。

3）Ⅱ型试样加强片粘结时：①用细砂纸打磨或喷砂粘结表面，注意不要损伤材料强度；②用溶剂（如丙酮）清晰粘结表面；③用韧性较好的室温固化粘合剂（如环氧胶粘剂）粘结；④对试样粘结部位加压一定时间直至完成固化。

## 2.18.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10%～90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 ±1%。

**2. 夹具**

Ⅲ型试样使用的夹具如图 2-105 所示。夹具与试验机相连时，要确保试样受拉时对中。

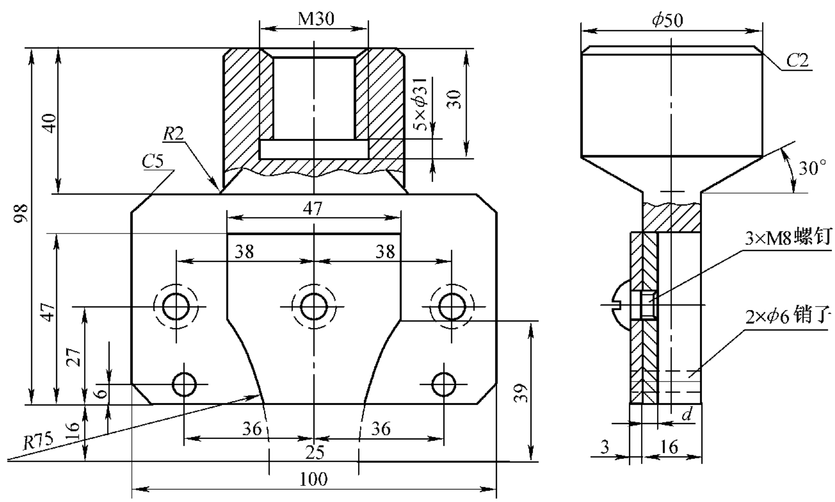



图 2-105　Ⅲ型试样使用的夹具

注：试样厚度为 6mm 时，间隙板厚度 $d_2$ 为 3mm；试样厚度为 3mm 时，间隙板厚度 $d_2$ 为 5mm。

## 2.18.3　试验内容及结果分析

**1. 试验环境**

（1）实验室标准环境条件　温度：23℃ ±2℃；相对湿度：50% ±10%。

（2）实验室非标准环境条件　若不具备实验室标准环境条件时，选择接近实验室标准环境条件的实验室环境条件。

**2. 试样数量**

试样每组不少于 5 个，并保证同批有 5 个有效试样。

**3. 试样的状态调节**

1）试验前，试样在实验室标准环境条件下至少放置 24h。

2）若不具备实验室标准环境条件，试验前，试样可在干燥器内至少放置 24h。

3）特殊状态调节条件按需要而定。

**4. 加载速度**

1）测定拉伸弹性模量、泊松比、断裂伸长率和绘制应力-应变曲线时，加载速度一般为 2mm/min。

2）测定拉伸应力（拉伸屈服应力、拉伸断裂应力或拉伸强度）时：①常规试验中，Ⅰ型试样的加载速度为 10mm/min，Ⅱ型、Ⅲ型试样的加载速度为 5mm/min；②仲裁试验中，Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型试样的加载速度均为 2mm/min。

**5. 纤维增强塑料拉伸性能测定**

1）将合格试样进行编号、画线和测量试样工作段任意 3 处的宽度和厚度，取算术平均值。

2）夹持试样，使试样的中心线与上、下夹具的对准中心线一致。

3）在试样工作段安装测量变形的仪表。施加初载（约为破坏载荷的 5%），检查并调整试样及变形测量仪表，使整个系统处于正常工作状态。

4）测定拉伸应力时连续加载直至试样破坏，记录试样的屈服载荷、破坏载荷或最大载荷及试样破坏形式。

5）测定拉伸弹性模量、泊松比时，无自动记录装置可采用分级加载，级差为破坏载荷的 5% ~10%。至少分五级加载，施加载荷不宜超过破坏载荷的 50%。一般至少重复测定 3 次，取其两次稳定的变形增量，记录各级载荷和相应的变形值。

6）测定拉伸弹性模量、泊松比、断裂伸长率和绘制应力-应变曲线时，有自动记录装置，可连续加载。

7）若试样出现以下情况应予作废：①试样破坏在明显内部缺陷处；②Ⅰ型试样破坏在夹具内或圆弧处；③Ⅱ型试样破坏在夹具内或试样断裂处离夹紧处的距离小于 10mm。

8）同批有效试样不足 5 个时，应重作试验。

9）Ⅲ型试样破坏在非工作段时，仍用工作段横截面积来计算拉伸强度，且应记录试样断裂位置。

10）拉伸应力（拉伸屈服应力、拉伸断裂应力或拉伸强度）按下式计算：

$$\sigma_t = \frac{F}{bd}$$

式中　$\sigma_t$——拉伸应力（拉伸屈服应力、拉伸断裂应力或拉伸强度），单位为 MPa；

$F$——屈服载荷、破坏载荷或最大载荷，单位 N；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$d$——试样厚度，单位为 mm。

11）试样断裂伸长率按下式计算：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_b}{L_0} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon_t$——试样断裂伸长率（%）；

$\Delta L_b$——试样拉伸断裂时标距 $L_0$ 内的伸长量，单位为 mm；

$L_0$——测量的标距，单位为 mm。

12）拉伸弹性模量采用分级加载时按下式计算：

$$E_t = \frac{L_0 \Delta F}{bd\Delta L}$$

式中　$E_t$——拉伸弹性模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——载荷-变形曲线上初始直线段的载荷增量，单位为 N；

$\Delta L$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的标距 $L_0$ 内的变形增量，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$d$——试样厚度，单位为 mm；

$L_0$——测量的标距，单位为 mm。

13）采用自动记录装置测定时，对于给定的应变 $\varepsilon'' = 0.0025$ 和 $\varepsilon' = 0.0005$，拉伸弹性模量按下式计算：

$$E_t = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'}$$

式中　$E_t$——拉伸弹性模量，单位为 MPa；

$\sigma''$——应变 $\varepsilon'' = 0.0025$ 时测得的拉伸应力值，单位为 MPa；

$\sigma'$——应变 $\varepsilon' = 0.0005$ 时测得的拉伸应力值，单位为 MPa。

注：如材料说明或技术说明中另有规定，$\varepsilon''$和 $\varepsilon'$可取其他值。

14）泊松比按下式计算：

$$\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

式中　$\mu$——泊松比；

$\varepsilon_1$、$\varepsilon_2$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的轴向应变和横向应变。

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

式中　$L_1$、$L_2$——轴向和横向的测量标距，单位为 mm；

$\Delta L_1$、$\Delta L_2$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的标距 $L_1$ 和 $L_2$ 的变形增量，单位为 mm。

**6. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，断裂伸长率和泊松比保留 2 位有效数字，其他数值保留 3 位有效数字。

## 2.19　纤维增强热固性塑料管轴向拉伸试验

纤维增强热固性塑料管轴向拉伸试验按照 GB/T 5349—2005《纤维增强热固性塑料管轴向拉伸性能试验方法》进行。

### 2.19.1　整体拉伸试验

**1. 整体拉伸试样**

整体拉伸试样形状和尺寸如图 2-106 和表 2-58 所示。

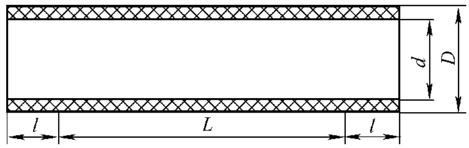



图 2-106　整体拉伸试样

*D*—试样外径（mm）　*d*—试样内径（mm）　*l*—两夹持段间长度（mm）　*L*—夹持段长度（mm）

试样端面应与其轴线垂直，且平整、无分层、撕裂等现象。其余表面无损伤。若夹持段表面存在胶瘤或其他突起物，应予修平，但尽量避免损伤增强纤维。

**表 2-58　整体拉伸试样的尺寸**　　（单位：mm）

| 两夹持段间长度 *L* | 夹持段长度 *l* |
|---|---|
| ≥450 | 50～100 |

**2. 整体拉伸用试验设备**

（1）试验机　试验机应符合下列要求：

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10%～90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 ±1%。

（2）夹持装置　夹持装置应具有足够的强度、刚度和尺寸加工精度。在拉力作用下，不使试样在夹持段内破坏，且应尽量避免与试样产生相对位移。图 2-107 所示为适用于公称直径不大于 100mm 试样的夹持装置。

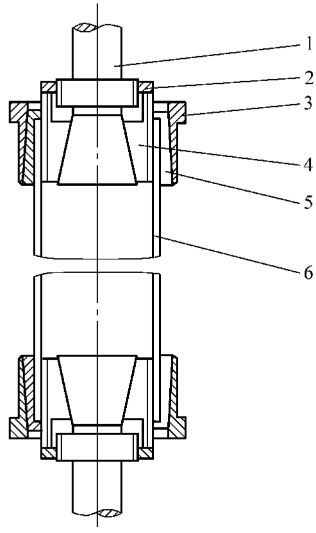



图 2-107　试样的夹持装置

1—芯杆　2—预紧螺母和垫圈　3—刚性外套　4—瓣形摩擦内套　5—弹性开口衬套　6—试样

**3. 试验环境**

实验室标准环境条件如下：①温度：23℃ ±2℃；②相对湿度：50% ±10%。若不具备实验室标准环境

条件时，应选择接近实验室标准环境条件的实验室环境条件。

**4. 试样处理**

具备条件时试样至少在温度 23℃ ±2℃ 环境中放置 4h，并在相同环境下进行试验；不具备条件时在实验室环境温度下进行试验。仲裁试验时，试样至少在温度 23℃ ±2℃ 和相对湿度 50% ±10% 的环境中存放 40h，并在同样环境下进行试验。

**5. 加载速度**

测定拉伸弹性模量、泊松比、断裂伸长率和绘制应力-应变曲线时，加载速度一般为 2mm/min。

**6. 试样数量及状态调节**

1）试样每组不少于 5 个，并保证同批有 5 个有效试样。

2）试样的状态调节包括：①试验前，试样在实验室标准环境条件下至少放置 24h；②若不具备实验室标准环境条件，试验前，试样可在干燥器内至少放置 24h；③特殊状态调节条件按需要而定。

**7. 试验步骤**

1）将合格试样编号并测量尺寸。

2）在试样夹持段间 3 个不同截面的位置上，分别测量相互垂直两个方向上外径，取其平均值为平均外径。

3）在试样任一端面的 8 个等间隔处测量壁厚，舍弃其中最大值和最小值，取其余各点的平均值为平均壁厚。对有非增强层的管材，应采用同样方法测量增强层厚度，并计算平均值。

4）将装好试样的夹持装置安装在试验机的两夹头间。安装时，应使夹持装置的芯杆与试验机上、下夹头的中心线对准。

5）均匀、连续加载，直至试样破坏。记录破坏载荷（或最大载荷）与试样的破坏情况。

6）若试样破坏在夹持段内或有明显缺陷处，应予作废。同批有效试样不足 5 个时，应重新作试验。

7）测定弹性模量时，有自动记录装置可连续加载，否则，应分级加载。测量仪表的标距应不小于 50mm。当采用分级加载测定弹性模量时，应至少分为 5 级，施加的最大载荷不应超过材料的弹性变形范围，记录各级载荷及相应的变形值。若测定断裂伸长率，应连续加载，记录试样断裂时测量标距内总的伸长量。

**8. 计算**

1）轴向拉伸强度按下式计算：

$$\sigma_{\mathrm{t}}=\frac{F}{\pi(D-t)t}$$

式中　$\sigma_{\mathrm{t}}$——轴向拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——破坏载荷（或最大载荷），单位为 N；

$D$——试样平均外径，单位为 mm；

$t$——试样平均壁厚（对有非增强层的管材，应为平均增强层厚度），单位为 mm。

2）轴向拉伸弹性模量按下式计算：

$$E_t = \frac{L_0 \Delta F}{\pi(D-t)t\Delta L}$$

式中 $E_t$——轴向弹性拉伸模量，单位为 MPa；

$L_0$——仪表测量标距，单位为 mm；

$\Delta F$——材料弹性范围内的载荷增量，单位为 N；

$\Delta L$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的标距 $L_0$ 内的变形增量，单位为 mm；

$D$——试样平均外径，单位为 mm；

$t$——试样平均壁厚（对有非增强层的管材，应为平均增强层厚度），单位为 mm。

3）断裂伸长率按下式计算：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_b}{L_0} \times 100\%$$

式中 $\varepsilon_t$——试样断裂伸长率（%）；

$\Delta L_b$——试样断裂时标距 $L_0$ 内总的伸长量，单位为 mm；

$L_0$——仪表测量标距，单位为 mm。

**9. 试验结果的数值修约**

按 GB/T 8170 的规定，试验结果数值修约到 3 位有效数字。

## 2.19.2 取样拉伸试验

**1. 取样拉伸试样**

1）取样拉伸试样形状和尺寸如图 2-108 和表 2-59 所示。

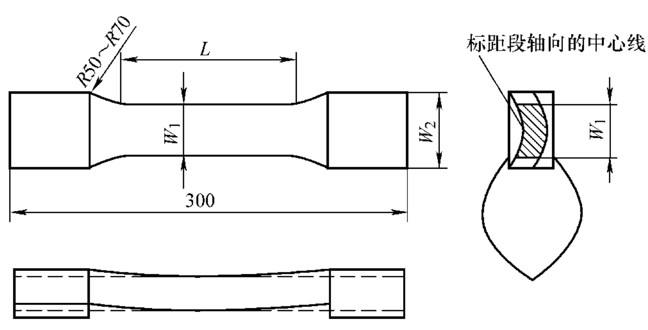



图 2-108 取样拉伸试样

$W_1$—标距段宽度（mm） $W_2$—端部宽度（mm） $L$—标距段长度（100 ~ 150mm）

表 2-59　取样拉伸试样的尺寸　（单位：mm）

| 公称直径 | $W_1$ | $W_2$ |
|---|---|---|
| ≤150 | 10±1 | 18±2 |
| >150 | 25±1 | 40±2 |

2）试样加工方向应保证试样轴线和管轴线一致，夹持段两端用热固性树脂涂平。

**2. 取样拉伸试验设备**

取样拉伸用试验设备的试验机与整体拉伸用试验机完全相同，但不需要用专用的试样夹持装置。

**3. 取样拉伸试验要求**

取样拉伸用试验要求与整体拉伸完全相同。

**4. 取样拉伸试验性能的测定**

1）轴向拉伸强度按下式计算：

$$\sigma_t = \frac{F}{bd}$$

式中　$\sigma_t$——轴向拉伸强度，单位为 MPa；
$F$——屈服载荷、破坏载荷或最大载荷，单位 N；
$b$——试样宽度，单位为 mm；
$d$——试样厚度，单位为 mm。

2）轴向拉伸弹性模量按下式计算：

$$E_t = \frac{L_0 \Delta F}{bd\Delta L}$$

式中　$E_t$——拉伸弹性模量，单位为 MPa；
$\Delta F$——载荷-变形曲线上初始直线段的载荷增量，单位为 N；
$\Delta L$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的标距 $L_0$ 内的变形增量，单位为 mm；
$b$——试样宽度，单位为 mm；
$d$——试样厚度，单位为 mm；
$L_0$——测量的标距，单位为 mm。

**5. 试验结果的数值修约**

按 GB/T 8170 的规定，试验结果数值修约到 3 位有效数字。

## 2.20　塑料焊接试样拉伸性能试验

塑料焊接试样拉伸性能试验按照 HG/T 4282—2011《塑料焊接试样　拉伸检测方法》进行。

### 2.20.1　试样

**1. 取样要求**

1）焊件应有下列识别标记：①材料牌号；②焊工标识号。

2）选择合适的焊件作为试件。试样应从试件上按规定截取，截取时焊接接头垂直于焊缝轴线方向，按 GB/T 11997 的要求进行加工。试样加工完成后，焊缝的轴线应位于试样平行长度部分的中间。管材取样方法如图 2-109 所示。

**2. 试样形状和尺寸**

1）板材、管材拉伸试样形状如图 2-110 和图 2-111 所示。

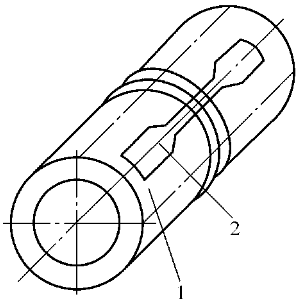



图 2-109　管材取样方法

1—试件　2—所取的试样

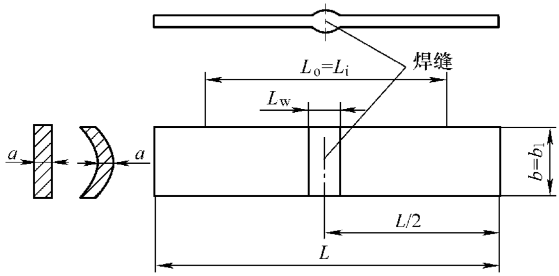



图 2-110　板材、管材拉伸试验矩形试样

$L$—试样总长度（mm）　$L_o$—原始标距（mm）　$L_i$—带过渡弧试样长度（mm）　$L_w$—焊缝宽度（mm）　$a$—试样厚度（mm）　$b$—平行长度部分宽度（mm）　$b_1$—夹持端宽度（mm）

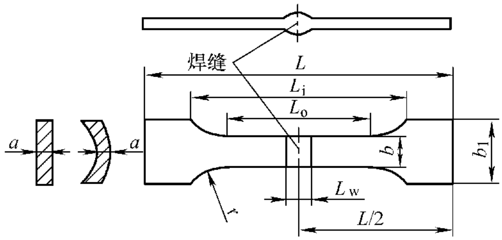



图 2-111　板材、管材拉伸试验哑铃形试样

$L$—试样总长度（mm）　$L_o$—原始标距（mm）　$L_i$—带过渡弧试样长度（mm）　$L_w$—焊缝宽度（mm）　$a$—试样厚度（mm）　$b$—平行长度部分宽度（mm）　$b_1$—夹持端宽度（mm）

2）矩形试样的尺寸如表 2-60 所示，哑铃形试样的尺寸如表 2-61 所示。

**表 2-60　矩形试样的尺寸**　（单位：mm）

| 公称外径 $d_n$ 或厚度 $a$ | | $b$ | $L_o$ | $L$ |
|---|---|---|---|---|
| 管材 | $20 \leqslant d_n < 50$ | $a + 0.1d_n$ | 80 | ≥120 |
| | $50 \leqslant d_n < 100$ | $a + 0.1d_n$ | 120 | ≥170 |
| | $d_n \geqslant 100$ | 试样的尺寸选择：按相同厚度板材的试样尺寸 | | |
| 板材 | $a \leqslant 10$ | 15 | 120 | ≥170 |
| | $10 < a \leqslant 20$ | 30 | 120 | ≥300 |
| | $a > 20$ | $1.5a$ | 200 | ≥400 |

表 2-61　哑铃形试样的尺寸　（单位：mm）

| 公称外径 $d_n$ 或厚度 $a$ | | $b$ | $b_1$ | $L_o$ | $L$ | $r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 管材 | $20 \leqslant d_n < 50$ | $a + 0.1d_n$ | $b + 10$ | 80 | ≥120 | 60 |
| | $50 \leqslant d_n < 100$ | $a + 0.1d_n$ | $b + 10$ | 120 | ≥170 | 60 |
| | $d_n \geqslant 100$ | 试样的尺寸选择：按相同厚度板材的试样尺寸 | | | | |
| 板材 | $a \leqslant 10$ | 15 | 20 | 120 | ≥170 | 60 |
| | $10 < a \leqslant 20$ | 30 | 40 | 120 | ≥300 | 60 |
| | $a > 20$ | $1.5a$ | 80 | 200 | ≥400 | 60 |

注：过渡弧半径 $r$ 一般由铣刀直径保证。带过渡弧试样长度 $L_i$ 尺寸不作要求，其由 $L_o$、$r$、$b$、$b_1$ 等相关尺寸换算得出。

**3. 试样制备方法**

（1）一般要求　试样加工时应满足以下要求：

1）在制样过程中不得出现试样过热现象。如果在机械加工中使用冷却剂，应不影响试样性能。

2）试样表面应无损伤，内部无缺陷，厚度均匀。

3）试样标距的标记应不影响试样性能，硬质材料试样不得扭曲。

（2）取样方式　根据不同材料、不同厚度的焊件，采用机械加工方法进行取样。

用机械加工方法制取试样，应采用符合规定的制样机和铣刀，按要求加工试样。试样修整按以下要求进行：

1）试样上的卷边、焊缝余高可保留进行测试。

2）需要时，为了获得试样焊接强度比较准确的测试结果，可在试样焊缝处开一个直径为圆孔后进行测试，其试样的截面积应减去圆孔的轴向截面积。

3）试样焊缝处拉伸强度大于母材拉伸强度时，需获得焊缝处的具体拉伸强度，宜采用开孔试样进行检测。

（3）板材试样制备　按规定采用机械加工方法在焊件上裁取试样，保留焊缝余高。如果需在焊缝处开孔时，应将焊接余高采用机械加工方法加工至与母材同厚度。

（4）管材试样制备　按要求从管材上截取试样，制备时不得加热或压平，截取的试样尺寸应符合规定。

**4. 标线**

从焊缝轴向中心线向外两侧近似等距离画两条标线，标线间距离应精确到标距的1%或更优。画标线时不得以任何方式刮伤、冲击或施压于试样，避免试样受损伤。标线不应对被测试样产生不良影响，标注的线条应尽可能窄。

**5. 试样的检查**

试样应无扭曲，相邻的平面间应相互垂直。表面和边缘应无划痕、空洞、凹陷和飞边。试样可与直尺、直角尺、平板比对，目测并用游标卡尺检查是否符合这些要求。经检查发现试样有一项或几项不符合要求时，应舍弃或在试验前机加工至合适的尺寸和形状。

**6. 试样数量**

按取样的要求对焊件及母材各取 5 个试样。如果需要精密度更高的平均值，试样数

量可多于 5 个，并可用置信区间（95% 概率）估算得出。

## 2.20.2　试验设备

**1. 试验机**

试验机应符合 GB/T 17200 的规定。

**2. 测量试样宽度和厚度的仪器**

应采用游标卡尺或等效的仪器测量试样宽度和厚度，其读数精度为 0.02mm 或更优。

**3. 制样机和铣刀**

制样机和铣刀应能制备符合规定的试样尺寸。

## 2.20.3　试验内容及结果表示

**1. 试验环境**

除非有关方面另有商定，试验室环境条件应满足下列要求或与试样状态调节环境相同：

1）温度：23℃ ±2℃或 27℃ ±2℃。

2）相对湿度：50% ±10% 或 65% ±10%。

**2. 试样状态调节**

应采用 GB/T 2918 中环境等级为“2（一般）”的条件进行状态调节。当知道材料的拉伸性能不受温度和湿度影响时，温度可保持在 18 ~28℃，湿度不需控制。

**3. 试样测量**

1）拉伸前，在每个试样原始标距 $L_o$ 的 5mm 以内测量宽度 $b$ 和厚度 $a$，测量精确至 0.02mm。

2）拉伸后，记录每个试样宽度和厚度的最大值和最小值，并确保其在允差范围内。

**4. 安装试样**

将试样放到夹具中，使试样的长轴线与试验机的轴线成一条直线。开机施加力，记录试验过程中施加的力和拉伸距离。

**5. 试样拉伸速度**

试样拉伸速度根据试样的材质选定。主要塑料材料试样的拉伸速度宜采用表 2-62 规定的拉伸速度。相同材料的焊接试样和未焊接试样在测试时采用相同的拉伸速度。

**表 2-62　主要塑料材料试样的拉伸速度**

| 材　　料 | 拉伸速度/(mm/min) | 材　　料 | 拉伸速度/(mm/min) |
|---|---|---|---|
| PVC-U、PVC-C | 5 | PTFE-TFM | 20 |
| PP | 20 | ABS | 20 |
| PE | 50 | PA | 20 |
| PVDF | 20 | | |

**6. 数据的记录**

开始拉伸时记录相关读数，如发生了屈服，记录屈服时的力，并至试验结束。记录试验过程中试样承受的负荷与之对应的标线间或夹具间距离的增量，此操作宜采用能得到完整应力-应变曲线的自动记录系统。

**7. 拉伸性能的测定**

沿试样纵向主轴恒速拉伸，直到试样断裂或变形达到预定数值，测量在这一过程中试样承受负荷及其伸长。

根据试样的原始横截面积按下式计算拉伸强度：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

式中　$\sigma$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——拉伸时最大负荷，单位为 N；

$A$——试样原始截面积，单位为 $mm^2$。

有开孔的试样按下式计算拉伸强度：

$$\sigma = \frac{F}{A - 3e}$$

式中　$\sigma$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——拉伸时最大负荷，单位为 N；

$A$——试样原始截面积，单位为 $mm^2$；

$e$——焊接处打的小孔直径，单位为 mm。

**8. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，拉伸强度保留 3 位有效数字。

## 2.21　玻璃纤维增强塑料层合板层间拉伸强度试验

玻璃纤维增强塑料层合板层间拉伸强度试验按照 GB/T 4944—2005《玻璃纤维增强塑料层合板层间拉伸强度试验方法》进行。

### 2.21.1　试样

**1. 试样形状和尺寸**

1）一般应采用Ⅰ型试样（见图 2-112）。板厚 $h$ 和直径 $d$ 应不小于 22mm。

2）当层合板的层间拉伸强度高于粘结强度时，采用Ⅱ型试样（见图 2-113）。若采用Ⅱ型试样仍不能满足试验要求则应选用Ⅲ型试样（见图 2-114），Ⅲ型试样通过专用夹头可直接与试验机相连接。

**2. 试样的加工**

1）试样的取位区，一般宜距板材边缘（已切除工艺毛边）30mm 以上，最小不得小于 20mm。若取位区有气泡、分层、树脂淤积、皱褶、翘曲、错误铺层等缺陷，则应避开。

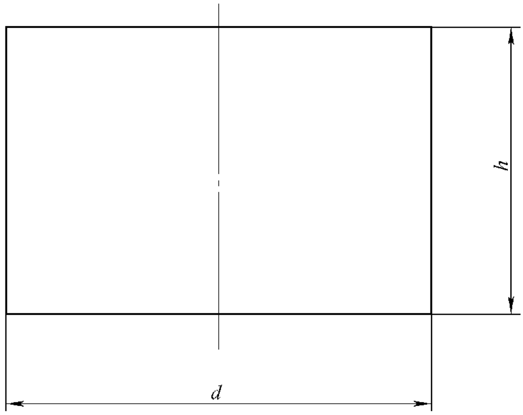



图 2-112　Ⅰ型试样

$d$—直径（mm）　$h$—厚度（mm）

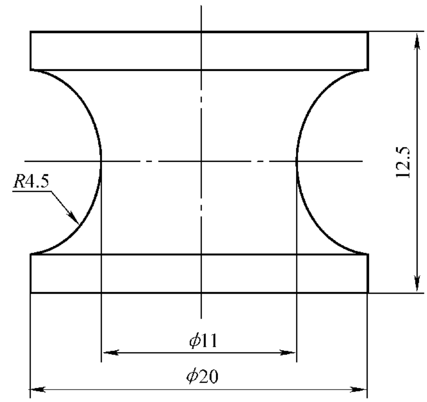



图 2-113　Ⅱ型试样

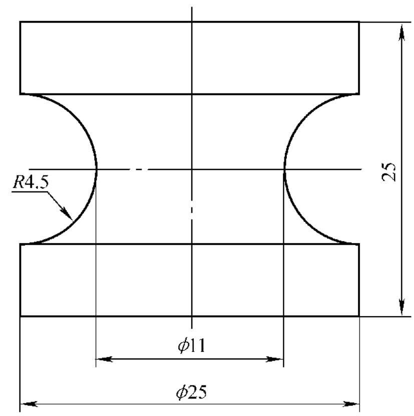



图 2-114　Ⅲ型试样

2）若对取位区有特殊要求或需从产品中取样时，则按有关技术要求确定，并在试验报告中注明。

3）纤维增强塑料一般为各向异性，应按各向异性材料的两个主方向或预先规定的方向（例如板的纵向和横向）切割试样，且严格保证纤维方向和铺层方向与试验要求相符。

4）纤维增强塑料试样应采用硬质合金刃具或砂轮片等加工。加工时要防止试样产生分层、刻痕和局部挤压等机械损伤。

5）加工试样时，可采用水冷却（禁止用油）。加工后，应在适宜的条件下对试样及时进行干燥处理。

6）对试样的成型表面不宜加工。当需要加工时，一般采用单面加工，并在试验报告中注明。

7）模塑成型的试样按产品标准或技术规范的规定进行制备。在试验报告中注明制备试样的工艺条件及成型时受压的方向。

**3. 试样数量**

Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型三种试样的数量均为 10 个。

**4. 试样组合件及制备**

对于Ⅰ型和Ⅱ型试样须制成试样组合件（见图 2-115），进行层间拉伸强度测定。

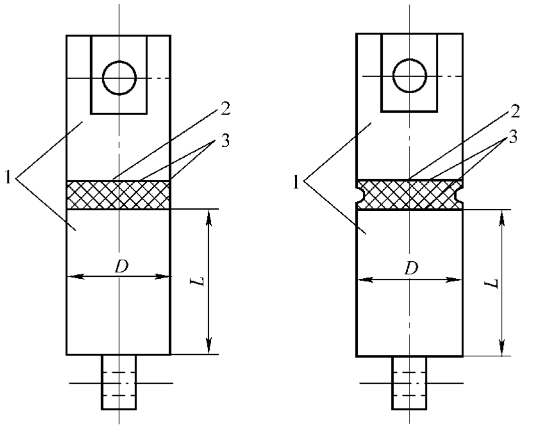
金属连接块直径 $D$ 为 20mm ± 0. 1mm；等直径圆柱段长度 $L$ 不小于 30mm。连接块另一端的形状和尺寸应根据试验机确定。粘合面应保持平整无缺陷，并垂直于金属连接块的轴线。

粘合剂的粘接强度应高于层间拉伸强度，建议采用环氧基粘合剂。

粘结面的表面处理，固化条件如温度、压力、时间等均按粘合剂使用说明中的工艺规程进行。粘合剂及其固化条件不应改变层合板的性能。

粘合面涂以粘合剂，用对中装置（见图 2-116）保证试样正确的粘合和精确地定位。

Ⅰ型试样须将试样多于金属连接块的部分去除并磨光。




Ⅰ型　　Ⅱ型

图 2-115　试样组合件

1—上、下金属连接块（钢或铝）　2—试样
3—粘合剂层　*L*—金属连接块圆柱段长度（mm）　*D*—金属连接块直径（mm）

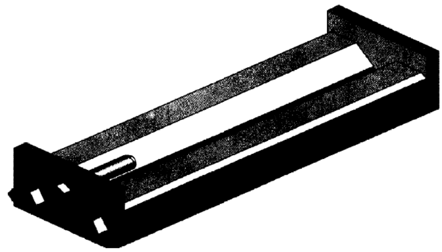


图 2-116　对中装置示意图

## 2.21.2　试样设备

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10%～90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差应不超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均应不超过 ±1%。

6）Ⅲ型试样层间拉伸强度试验专用夹具如图2-117 所示。

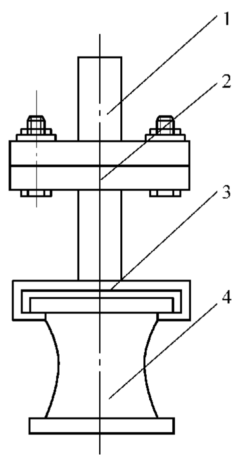



图 2-117　层间拉伸强度试验专用夹具示意图

1—拉杆　2—连接头
3—T 形卡头　4—Ⅲ型试样

### 2.21.3 试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）实验室标准环境条件：①温度为23℃ ±2℃；②相对湿度为50% ±10%。

2）若不具备实验室标准环境条件时，选择接近实验室标准环境条件的实验室环境条件。

3）I型试样，加载速度为0.02*h*/min（*h* 为试样厚度，单位为mm），Ⅱ型和Ⅲ型试样加载速度应为0.2mm/min。

4）测量Ⅰ型试样任一横截面或Ⅱ型/Ⅲ型试样最小横截面的直径，测量值精确至0.1mm。

5）将试样组合件或Ⅲ型试样装入试验机夹具中，试样中心线应与试验机力轴重合。

6）按规定的加载速度对试样组合件施加均匀、连续载荷直至破坏。记录最大载荷和破坏情况。

7）在粘接面或圆弧段中心范围1/3以外处破坏的试样无效。同批有效试样不足5个时，应重新作试验。

**2. 层间拉伸强度的测定**

将试样粘合到钢或铝制端面上，沿层合面垂直方向匀速拉伸，直至试样破坏，测量该过程中对试样施加的载荷，确定层间拉伸强度。

层间拉伸强度按下式计算：

$$\sigma_{\mathrm{i}} = \frac{F}{A}$$

式中 $\sigma_{\mathrm{i}}$——层间拉伸强度，单位为MPa；

$F$——最大载荷，单位为N；

$A$——试样横截面积（Ⅱ型、Ⅲ型试样取最小横截面积），单位为$mm^2$。

**3. 试验结果数值的修约**

按GB/T 8170进行修约，层间拉伸强度保留3位有效数字。

## 2.22 热塑性塑料管材拉伸性能试验

热塑性塑料管材拉伸性能试验按照GB/T 8804.1—2003《热塑性塑料管材拉伸性能测定　第1部分：试验方法总则》、GB/T 8804.2—2003《热塑性塑料管材拉伸性能测定　第2部分：硬聚氯乙烯（PVC-U）、氯化聚氯乙烯（PVC-C）和高抗冲聚氯乙烯（PVC-HI）管材》和GB/T 8804.3—2003《热塑性塑料管材　拉伸性能测定　第3部分：聚烯烃管材》进行。

### 2.22.1 试样

**1. 硬聚氯乙烯、氯化聚乙烯和高抗冲聚氯乙烯管材试样**

1）机械加工试样（类型1）如图2-118所示，尺寸如表2-63所示。

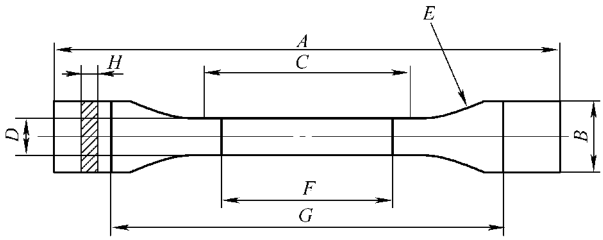



图 2-118　机械加工试样（类型 1）

**表 2-63　机械加工试样**（类型 1）**尺寸**　　（单位：mm）

| 符　　号 | 说　　明 | 尺　　寸 |
|---|---|---|
| *A* | 最小总长度 | 115 |
| *B* | 端部宽度 | ≥15 |
| *C* | 平行部分长度 | 33 ±2 |
| *D* | 平行部分宽度 | $6^{+0.4}_{0}$ |
| *E* | 半径 | 14 ±1 |
| *F* | 标线间长度 | 25 ±1 |
| *G* | 夹具间距离 | 80 ±5 |
| *H* | 厚度 | 管材实际厚度 |

2）冲裁试样（类型 2）如图 2-119 所示，尺寸如表 2-64 所示。

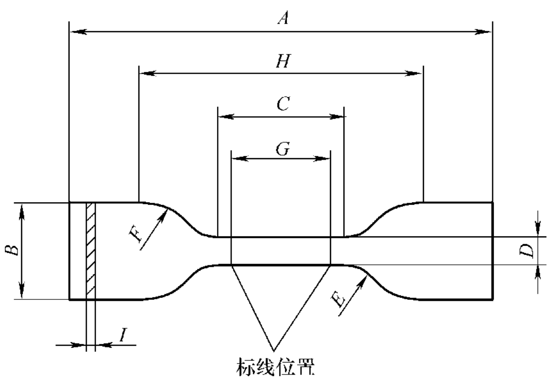



图 2-119　冲裁试样（类型 2）

**表 2-64　冲裁试样**（类型 2）**尺寸**　　（单位：mm）

| 符　　号 | 说　　明 | 尺　　寸 |
|---|---|---|
| *A* | 最小总长度 | 115 |
| *B* | 端部宽度 | 25 ±1 |
| *C* | 平行部分长度 | 33 ±2 |
| *D* | 平行部分宽度 | $6^{+0.4}_{0}$ |
| *E* | 小半径 | 14 ±1 |
| *F* | 大半径 | 25 ±2 |
| *G* | 标线间长度 | 25 ±1 |
| *H* | 夹具间距离 | 80 ±5 |
| *I* | 厚度 | 管材实际厚度 |

3）硬聚氯乙烯和高抗冲聚氯乙烯管材的试样制备方法如下：①管材壁厚小于或等于12mm采用冲裁或机械加工方法制样，实验室间比对和仲裁试验采用机械加工方法制样；②管材壁厚大于12mm采用机械加工方法制样。

4）氯化聚氯乙烯管材或硬聚氯乙烯与高抗冲聚氯乙烯共混料制作的管材，不论其厚度大小均采用机械加工方法制样。

5）将样条放置于125～130℃的烘箱中加热，加热时间按每毫米壁厚加热1min计算。加热结束取出样条，快速地将裁刀置于样条内表面，均匀地一次施压裁切得试样，然后将试样放置于空气中冷却至常温。必要时可加热裁刀。

6）公称外径大于110mm规格的管材，直接采用机械加工方法制样。

7）公称外径小于或等于110mm规格的管材，应将截取的样条在下列条件下压平后制样：①硬聚氯乙烯和高抗冲聚氯乙烯管加热温度为125～130℃，氯化聚氯乙烯或氯化聚氯乙烯与硬聚氯乙烯共混料制作的管材加热温度为135～140℃；②加热时间按1min/mm计算；③施加的压力不应使样条的壁厚发生减小。压平后在空气中冷却至常温，然后用机械加工方法制样。

**2. 聚烯烃管材试样**

管材壁厚小于或等于12mm规格的管材，可采用哑铃形裁刀冲裁或机械加工的方法制样。管材壁厚大于12mm的管材，应采用机械加工的方法制样。

（1）试样尺寸　依据管材厚度的大小，在图2-120及表2-65、图2-121及表2-66、图2-122及表2-67中选择一种形状和尺寸的试样。类型1的试样等同于GB/T 1040中的类型1B试样。较小一些的试样等同于GB/T 8804.2中的类型2试样。

为避免试样在夹具内滑脱，建议试样端部的宽度（$b_2$）与厚度（$e_n$）关系式为

$$b_2 = e_n + 15\text{mm}$$

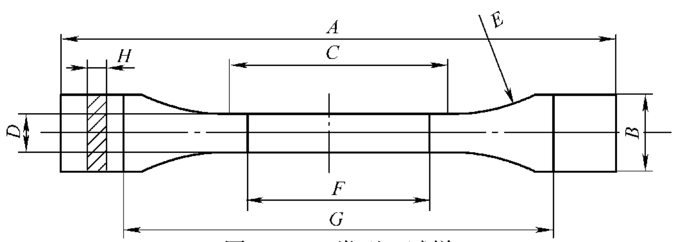



图2-120　类型1试样

**表2-65　类型1试样尺寸**　　（单位：mm）

| 符　号 | 说　明 | 尺　寸 |
|---|---|---|
| *A* | 最小总长度 | 150 |
| *B* | 端部宽度 | 20±0.2 |
| *C* | 平行部分长度 | 60±0.5 |
| *D* | 平行部分宽度 | 10±0.2 |
| *E* | 大半径 | 60 |
| *F* | 标线间距离 | 50±0.5 |
| *G* | 夹具间距离 | 115±0.5 |
| *H* | 壁厚 | 管材壁厚 |

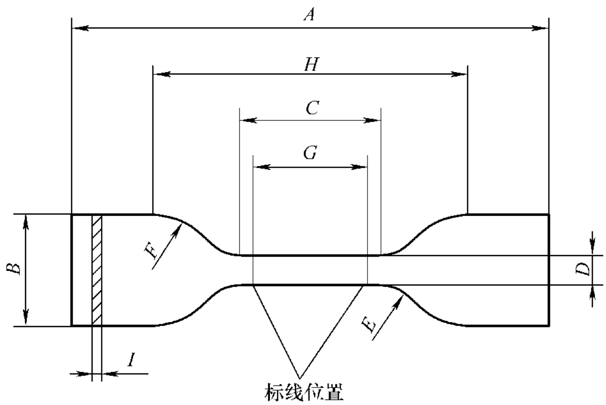



图 2-121　类型 2 试样

**表 2-66　类型 2 试样尺寸**　（单位：mm）

| 符　　号 | 说　　明 | 尺　　寸 |
|---|---|---|
| *A* | 最小总长度 | 115 |
| *B* | 端部宽度 | 25 ±1 |
| *C* | 平行部分长度 | 33 ±2 |
| *D* | 平行部分宽度 | 6 ±0.4 |
| *E* | 小半径 | 14 ±1 |
| *F* | 大半径 | 25 ±2 |
| *G* | 标线间距离 | 25 ±2 |
| *H* | 壁厚夹具间距离 | 80 ±5 |
| *I* | 壁厚 | 管材壁厚 |

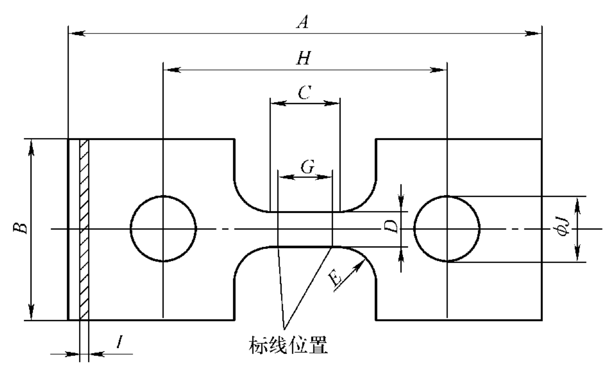



图 2-122　类型 3 试样

**表 2-67　类型 3 试样尺寸**　　（单位：mm）

| 符号 | 说明 | 尺寸 |
|---|---|---|
| $A$ | 最小总长度 | 250 |
| $B$ | 端部宽度 | 100 ± 3 |
| $C$ | 平行部分长度 | 25 ± 1 |
| $D$ | 平行部分宽度 | 25 ± 1 |
| $E$ | 半径 | 25 ± 1 |
| $G$ | 标线间距离 | 20 ± 1 |
| $H$ | 载荷销间的距离 | 165 ± 5 |
| $I$ | 厚度 | 管材壁厚 |
| $J$ | 孔径 | 30 ± 5 |

（2）试样的制备　试样应按照要求从所取样条的中部制取。

1）壁厚小于或等于 12mm 的管材，根据下列类型应采用裁刀冲裁或机械加工制样：①壁厚大于 5mm 但小于或等于 12mm 的管材采用类型 1；②壁厚小于或等于 5mm 的管材采用类型 2。

2）壁厚大于 12mm 的管材，应采用类型 1 或类型 3 用机械加工方法制样。

（3）裁切方法　根据管材的厚度，选择与类型 1 或类型 2 试样截面对应的裁刀，在室温下使用裁刀，在样条的内表面均匀地一次施压冲裁试样。

**3. 从管材上取样条**

从管材上取样条时不应加热或压平，样条的纵向平行于管材的轴线，取样位置应符合下面的要求。

1）公称外径小于或等于 63mm 的管材，取长度约 150mm 的管段，以一条任意直线为参考线，沿圆周方向取样。除特殊情况外，每个样品应取 3 个样条，以便获得 3 个试样，如表 2-68 所示。

**表 2-68　取样数量**

| 公称外径 $d_n$/mm | $15 \leqslant d_n < 75$ | $75 \leqslant d_n < 280$ | $280 \leqslant d_n < 450$ | $d_n \geqslant 450$ |
|---|---|---|---|---|
| 样条数 | 3 | 5 | 5 | 8 |

2）公称外径大于 63mm 的管材，取长度约 150mm 的管段，如图 2-123 所示沿管段周边均匀取样条。除另有规定外，应按表 2-68 中的要求根据管材的公称外径把管段沿圆周边分成一系列样条，每块样条制取试样 1 片。

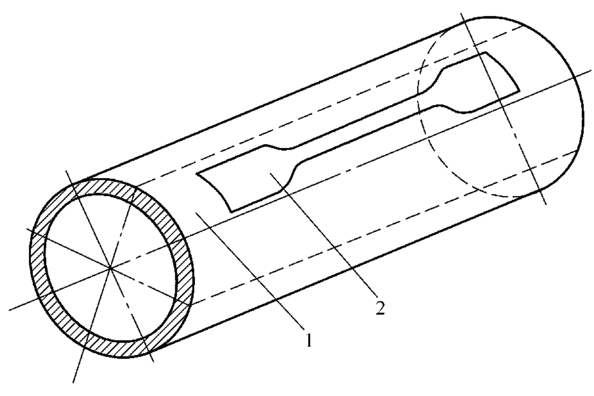


图 2-123　试样制备

1—样条　2—试样

**4. 标线**

从中心点近似等距离画两条标线，标线间距离应精确到 1%。

画标线时不得以任何方式刮伤、冲击或施压于试样。以避免试样受损伤。标线不应对被测试样产生不良影响，标注的线条应尽可能窄。

## 2.22.2　试验设备

**1. 拉伸试验机**

应符合 GB/T 17200 的规定。

**2. 夹具**

用于夹持试样的夹具连在试验机上，使试样的长轴与通过夹具中心线的拉力方向重合。试样应夹紧，使它相对于夹具尽可能不发生位移。

夹具装置系统不得引起试样在夹具处过早断裂。

**3. 负载显示计**

拉力显示仪应能显示被夹具固定的试样在试验的整个过程中所受拉力，它在一定速度下测定时不受惯性滞后的影响，并且其测定的准确度应控制在实际值的 ±1% 范围内。注意事项应按照 GB/T 17200 的要求。

**4. 引伸计**

测定试样在试验过程中任一时刻的长度变化。

此仪表在一定试验速度时必须不受惯性滞后的影响且能测量误差范围在 1% 内的形变。试验时，此仪表应安置在使试样经受最小的伤害和变形的位置，且它与试样之间不发生相对滑移。

夹具应避免滑移，以防影响伸长率测量的精确性。

推荐使用自动记录试样的长度变化或任何其他变化的仪表。

**5. 测量仪器**

用于测量试样厚度和宽度的仪器，精度为 0.01mm。

**6. 裁刀**

应可裁出符合相应要求的试样。

**7. 制样机和铣刀**

应能制备符合相应要求的试样。

## 2.22.3　试验内容及结果表示

**1. 状态调节**

除生产检验或相关标准另有规定外，试样应在管材生产 15h 之后测试。试验前根据试样厚度，应将试样置于 23℃ ±2℃ 的环境中进行状态调节，时间不少于表 2-69 规定。

**表 2-69　状态调节时间**

| 管材壁厚 $e_{min}$/mm | 状态调节时间 | 管材壁厚 $e_{min}$/mm | 状态调节时间 |
|---|---|---|---|
| $e_{min} < 3$ | 1h ±5min | $16 \leq e_{min} < 32$ | 10h ±1h |
| $3 \leq e_{min} < 8$ | 3h ±15min | $e_{min} \geq 32$ | 16h ±1h |
| $8 \leq e_{min} < 16$ | 6h ±30min | | |

**2. 试验速度**

试验速度和管材的材质和壁厚有关。

1）硬聚氯乙烯、氯化聚乙烯和高抗冲聚氯乙烯管材试样，不论壁厚大小，试验速度均取5mm/min ±0.5 mm/min。

2）聚烯烃管材试样的试验速度如表2-70所示。

**表2-70　聚烯烃管材试样的试验速度**

| 管材的公称壁厚 $e_n$/mm | 试样制备方法 | 试样类型 | 试验速度/(mm/min) |
|---|---|---|---|
| $e_n \leqslant 5$ | 裁刀裁切或机械加工 | 类型2 | 100 |
| $5 < e_n \leqslant 12$ | 裁刀裁切或机械加工 | 类型1 | 50 |
| $e_n > 12$ | 机械加工 | 类型1 | 25 |
| $e_n > 12$ | 机械加工 | 类型3 | 10 |

**3. 试验步骤**

试验应在温度23℃ ±2℃环境下按下列步骤进行。

1）测量试样标距间中部的宽度和最小厚度，精确到0.01mm，计算最小截面积。

2）将试样安装在拉伸试验机上，并使其轴线与拉伸应力的方向一致，使夹具松紧适宜以防止试样滑脱。

3）使用引伸计，将其放置或调整在试样的标线上。

4）选定试验速度进行试验。

5）记录试样的应力-应变曲线直至试样断裂，并在此曲线上标出试样达到屈服点时的应力和断裂时标距间的长度，或直接记录屈服点处的应力值及断裂时标线间的长度。

如试样从夹具处滑脱或在平行部位之外渐宽处发生拉伸变形并断裂，应重新取相同数量的试样进行试验。

对于聚烯烃管材试样的试验，如果试样的伸长率达到1000%，应在它断裂前停止试验。

**4. 管材拉伸性能的测定**

（1）拉伸屈服应力　对于每个试样，拉伸屈服应力以试样的初始截面积为基础，按下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

式中　$\sigma$——拉伸屈服应力，单位为MPa；

$F$——屈服点的拉力，单位为N；

$A$——试样的原始截面积，单位为$mm^2$。

（2）断裂伸长率　对于每个试样，断裂伸长率按下式计算：

$$\varepsilon = \frac{L - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon$——断裂伸长率（%）；

$L$——断裂时标线间的长度，单位为mm；

$L_o$——标线间的原始长度，单位为 mm。

**5. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，拉伸屈服应力和断裂伸长率保留 3 位有效数字。

## 2.23　聚乙烯管材和管件热熔对接接头拉伸强度试验

聚乙烯管材和管件热熔对接接头拉伸强度试验按照 GB/T 19810—2005《聚乙烯（PE）管材和管件热熔对接接头拉伸强度和破坏形式的测定》进行。

### 2.23.1　试样

对每一所需试样，应穿过接头沿管材的轴向加工出一长条，并进一步加工以制备符合以下尺寸的试样：

1）对于壁厚 < 25mm 的管材，选用 A 型试样，如图 2-124 和表 2-71 所示。

2）对于壁厚 ≥ 25mm 的管材，选用 B 型试样，如图 2-125 和表 2-71 所示。

适用时，使用样板以确保焊缝与 A 型或 B 型试样的腰部中心截面尽可能重合。卷边可以除去。

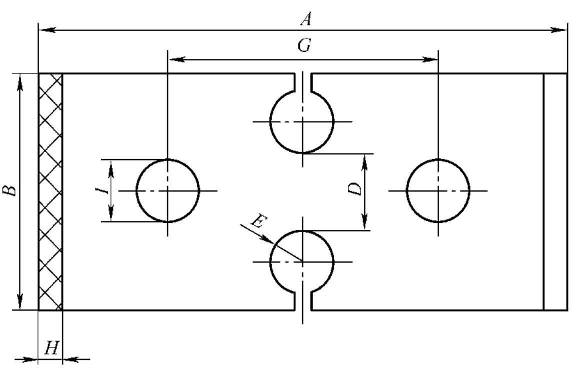



图 2-124　A 型试样

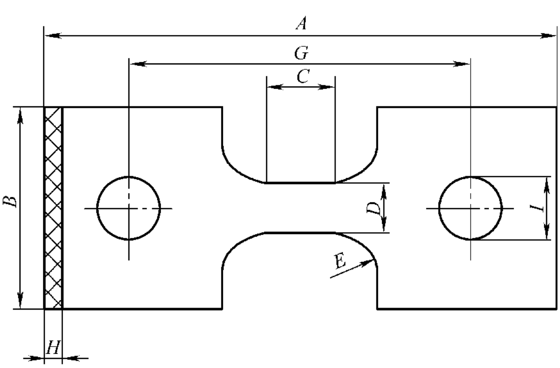



图 2-125　B 型试样

**表 2-71　A 型或 B 型试样的尺寸**　（单位：mm）

| 符　号 | 说　明 | A 型试样的尺寸 | | B 型试样的尺寸 |
|---|---|---|---|---|
| | | $d_n \leqslant 160$ | $d_n > 160$ | |
| $A$ | 总长(最小值) | 180 | 180 | 250 |
| $B$ | 末端宽度 | 60 ± 3 | 80 ± 3 | 100 ± 3 |
| $C$ | 狭长平行段长度 | — | — | 25 ± 1 |
| $D$ | 腰部宽度 | 25 ± 1 | 25 ± 1 | 25 ± 1 |
| $E$ | 半径 | 5 ± 0.5 | 10 ± 0.5 | 25 ± 1 |
| $G$ | 牵引孔中心距 | 90 ± 5 | 90 ± 5 | 165 ± 5 |
| $H$ | 厚度 | 全壁厚 | 全壁厚 | 全壁厚 |
| $I$ | 牵引孔直径 | 20 ± 5 | 20 ± 5 | 30 ± 5 |

试样的“腰部”应通过钻孔或其他机加工方式来获得，其中心距应为 35mm 或 45mm，孔的中心连线与焊缝重合。然后，在样条上将孔和对应的边之间切开。试样腰部的加工面应是平滑的，其余界面不作要求。

试样数量由管材的公称外径 $d_n$ 决定，如表 2-72 所示。

**表 2-72　试样的数量**

| 公称外径 $d_n$/mm | 试样的数目 | 公称外径 $d_n$/mm | 试样的数目 |
|---|---|---|---|
| $90 \leqslant d_n < 110$ | 2 | $180 \leqslant d_n < 315$ | 6 |
| $110 \leqslant d_n < 180$ | 4 | $d_n \geqslant 315$ | 7 |

注：其中一个试样应取自接头错边最大处，其他试样应沿接头圆周均匀取得。

## 2.23.2　试验设备

**1. 拉伸试验机**

能够以 5mm/min ± 1mm/min 的恒定速度拉伸，连续记录试样所承受的拉力，并能识别试样的破坏。

**2. 夹具**

配有可穿过试样牵引孔的销钉。

**3. 测量仪器**

测量试样的宽度和厚度，精度不低于 0.05mm。

## 2.23.3　试验内容及结果表示

**1. 实验室**

能够将温度控制在 23℃ ±20℃。

**2. 状态调节**

应在热熔对接 24h 后制样。试样应在 23℃ ±2℃的环境温度下进行状态调节不少于 6h，状态调节后立即进行试验。

**3. 试验步骤**

1）测量管材壁厚作为试样厚度，测量试样宽度：对于 A 型试样，宽度为腰部两孔的间距 $D$；对于 B 型试样，宽度为狭窄部分的宽度 $D$。

2）将试样固定在拉伸试验机夹具上，并保证施加于试样上的力垂直于对熔焊缝。

3）夹具以 5mm/min ± 1mm/min 的速度运动，对试样施加拉力。

4）记录拉伸过程中施加的拉力，直到试样完全破坏。

5）记录最大拉力和试样破坏类型（如韧性破坏或脆性破坏）。

**4. 对接接头拉伸强度的测定**

对接接头拉伸强度按下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

式中　$\sigma$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——最大拉力，单位为 N；

$A$——试样接头部分的截面积（宽度 × 厚度），单位为 $mm^2$。

**5. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，拉伸屈服应力和断裂伸长率保留 3 位有效数字。

## 2.24　软质泡沫聚合材料拉伸试验

软质泡沫聚合材料拉伸试验按照 GB/T 6344—2008《软质泡沫聚合材料　拉伸强度和断裂伸长率的测定》进行。

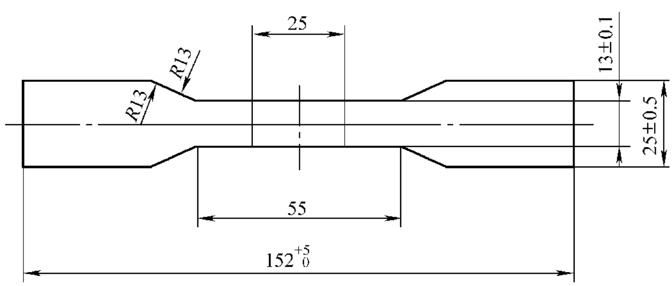
### 2.24.1　试样

**1. 取样方向**

如果产品的泡孔具有很明显的方向性（泡孔取向），在制备拉伸试样时，应当使试样的纵轴垂直于泡孔的长轴方向；否则，应在试验报告中说明试样纵轴位置与泡孔长轴的相对关系。

**2. 形状与尺寸**

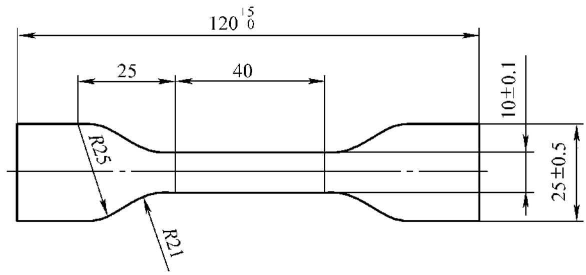
试样横截面应为矩形，带表皮或不带表皮层，无明显缺陷。拉伸试样用图 2-126 所示的两种刀模之一冲切，试样厚度为 10 ~ 15m。




a)

图 2-126　刀模尺寸示意图

a）第一类刀模




b)

图 2-126　刀模尺寸示意图（续）

b）第二类刀模

**3. 试样数量**

除非有关各方另行商定，否则，应提供足够的材料使每组试样至少有 5 个在标线内断裂。

## 2.24.2　试验设备

拉伸试验机，应符合下列要求：

1）拉伸试验机夹具的移动速度为 500mm/min ±50mm/min，且在试验过程中应保持匀速。

2）在使用负荷范围内，拉伸试验机测力精度应达到 0.5 级或 1.0 级。

3）为了测定断裂伸长应选用配备机械或光学伸长测量系统的拉伸试验机，所用伸长测量系统应符合 ISO 9513 的要求。初始标距精确到 ±1%。断裂标距精确到 ±1.25 mm。当力学伸长测量系统与试样连接时，应小心操作以免损坏试样。自重和惯性对拉伸强度的影响最大不超过 1%。

## 2.24.3　试验内容及结果表示

**1. 试样状态调节**

生产后不到 72h（可以包括状态调节时间）的材料一般不得用于试验。如果可以证明，生产后 16h 或 48h 得到的平均结果与生产后 72h 得到的平均结果差值不超过 ±10%，在这种情况下，允许在生产后 16h 或 48h 进行试验。

试验前，试样或用于冲切试样的材料应在下列任一种环境中进行状态调节 16h 以上。

1）23℃ ±2℃，相对湿度 50% ±5%。

2）27℃ ±2℃，相对湿度 65% ±5%。

在质量控制的情况下试验，试样可以在生产后较短的时间（最少 12h）和较少的状态调节时间（最少 6h）内，选择以上任何一种条件进行试验。

**2. 试验步骤**

1）用于冲切试样的材料在按照规定进行状态调节后，选择 5 个均匀分布的点测量其厚度。测量应符合 GB/T 6342 的要求，厚度差超过 ±2% 的材料应被剔除。

2）在每个试样上画两条平行的标线作为标距，1 型试样的两条标线内侧相距 25 ~ 50mm，1A 型试样为 40mm，标距测量精度为 ±1%。

3）将拉伸试验机载荷示值置于零位，把试样夹在拉伸试验机夹具上，仔细而对称地调整试样，使拉力均匀分布在试样横截面上，对试样施加 0.1kPa 的预应力或 0.5% 预伸长。完成预载荷或预伸长后，将伸长测量系统伸长示值清零，然后起动拉伸试验机，拉伸速度为 500mm/min ±50mm/min，记录拉伸过程最大载荷（精确至 ±1%）和试样断裂瞬间两标线间距（精确至 ±1.25 mm），剔除标线外断裂的试样，并继续试验直至获得 5 个满意的结果。

4）试验时的环境温度、湿度应与状态调节时相同。

注：为减少标线外断裂次数，推荐使用 1A 型试样。在使用 1 型试样时，应选择最接近 50mm 的标距。

**3. 拉伸性能的测定**

（1）拉伸强度　计算每个试样的平均厚度。按冲切试样中间部分（1 型宽度 13mm，1A 型宽度 10mm）的平均宽度和平均厚度计算原始横截面积。

按下式计算每个试样的拉伸强度：

$$TS = \frac{F}{A}$$

式中　$TS$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——最大载荷，单位为 N；

$A$——试样平均原始横截面积，单位为 $mm^2$。

（2）断裂伸长率　按下式计算断裂伸长率：

$$E_b = \frac{L - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$E_b$——断裂伸长率（%）；

$L$——试样断裂标距，单位为 mm；

$L_o$——试样原始标距，单位为 mm。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，拉伸强度和断裂伸长率保留 3 位有效数字。

## 2.25　硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸试验

硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸试验按照 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》进行。

### 2.25.1　试样

**1. 哑铃状试样**

哑铃状试样如图 2-127 所示。

试样狭窄部分的标准厚度，1 型、2 型、3 型和 1A 型为 2.0mm ±0.2mm，4 型为

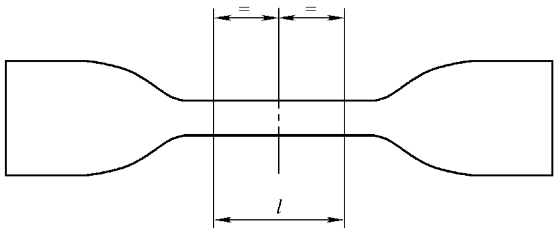



图 2-127　哑铃状试样

l—试验长度

1.0mm ±0.1mm。试验长度应符合表 2-73 的规定。哑铃状试样的其他尺寸应符合相应的裁刀所组出的要求。

非标准试样，例如取自成品的试样，狭窄部分的最大厚度：1 型和 1A 型为 3.0mm，2 型和 3 型为 2.5mm，4 型为 2.0mm。

**表 2-73　哑铃状试样的试验长度**

| 试样类型 | 1 型 | 1A 型 | 2 型 | 3 型 | 4 型 |
|---|---|---|---|---|---|
| 试验长度/mm | 25.0 ±0.5 | 20.0 ±0.5① | 20.0 ±0.5 | 10.0 ±0.5 | 10.0 ±0.5 |

① 试验长度不应超过试样狭窄部位的长度（表 2-74 中尺寸 C）。

试验用的所有裁刀和裁片机应符合 GB/T 2941 的要求。制备哑铃状试样用的裁刀尺寸如表 2-74 和图 2-128 所示，裁刀的狭窄平行部分任一点宽度的偏差应不大于 ±0.05mm。

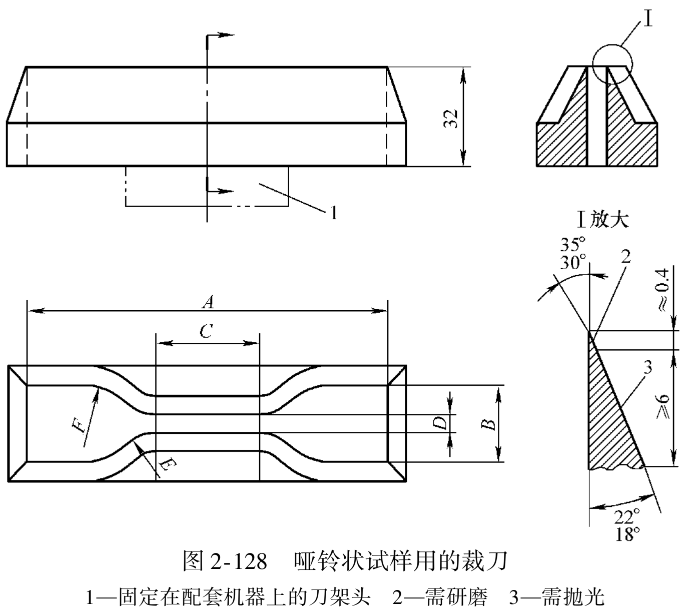



图 2-128　哑铃状试样用的裁刀

1—固定在配套机器上的刀架头　2—需研磨　3—需抛光

**表 2-74　哑铃状试样用裁刀尺寸**

| 尺　寸 | 1 型 | 1A 型 | 2 型 | 3 型 | 4 型 |
|---|---|---|---|---|---|
| A 总长度(最小)①/mm | 115 | 100 | 75 | 50 | 35 |
| B 端部宽度/mm | 25.0 ±1.0 | 25.0 ±1.0 | 12.5 ±1.0 | 8.5 ±0.5 | 6.0 ±0.5 |

（续）

| 尺　寸 | 1 型 | 1A 型 | 2 型 | 3 型 | 4 型 |
|---|---|---|---|---|---|
| *C* 狭窄部分长度/mm | 33.0 ± 2.0 | $20.0^{+2}_{0}$ | 25.0 ± 1.0 | 16.0 ± 1.0 | 12.0 ± 0.5 |
| *D* 狭窄部分宽度/mm | $6.0^{+0.4}_{0}$ | 5.0 ± 0.1 | 4.0 ± 0.1 | 4.0 ± 0.1 | 2.0 ± 0.1 |
| *E* 外侧过渡边半径/mm | 14.0 ± 1.0 | 11.0 ± 1.0 | 8.0 ± 0.5 | 7.5 ± 0.5 | 3.0 ± 0.1 |
| *F* 内侧过渡边半径/mm | 25.0 ± 2.0 | 25.0 ± 2.0 | 12.5 ± 1.0 | 10.0 ± 0.5 | 3.0 ± 0.1 |

① 为确保只有两端宽大部分与机器夹持器接触，增加总长度从而避免“肩部断裂”。

**2. 环状试样**

A 型标准环状试样的内径为 44.6mm ± 0.2mm。轴向厚度中位数和径向宽度中位数均为 4.0mm ± 0.2 mm。环上任一点的径向宽度与中位数的偏差不大于 ± 0.2mm，而环上任一点的轴向厚度与中位数的偏差应不大于 ± 2%。

B 型标准环状试样的内径为 8.0mm ± 0.1mm。轴向厚度中位数和径向宽度中位数均为 1.0mm ± 0.1mm。环上任一点的径向宽度与中位数的偏差不应大于 ± 0.1mm。

环状试样可用旋转式切片机切取，该机转速为 400r/min，并配备一个夹持刀片的专用夹具（见图 2-129）。刀片应用肥皂液润滑，并应经常对锋利度、损坏等进行检查。在用图 2-130 所示的工具切取时，样品应被夹紧。

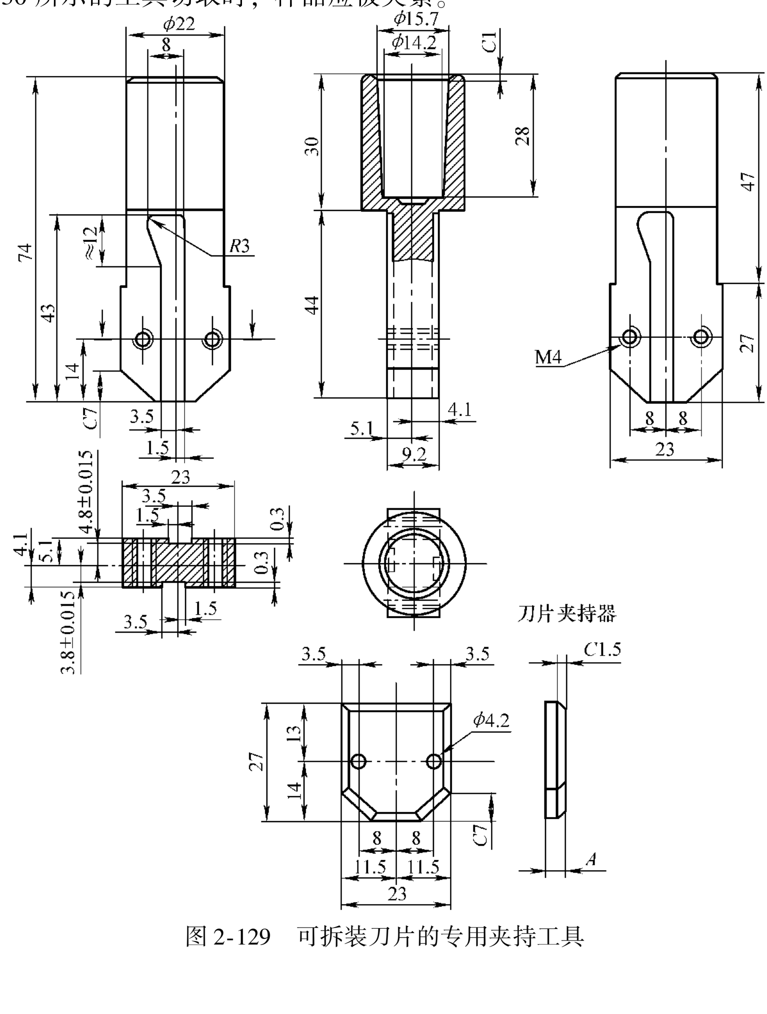



图 2-129　可拆装刀片的专用夹持工具

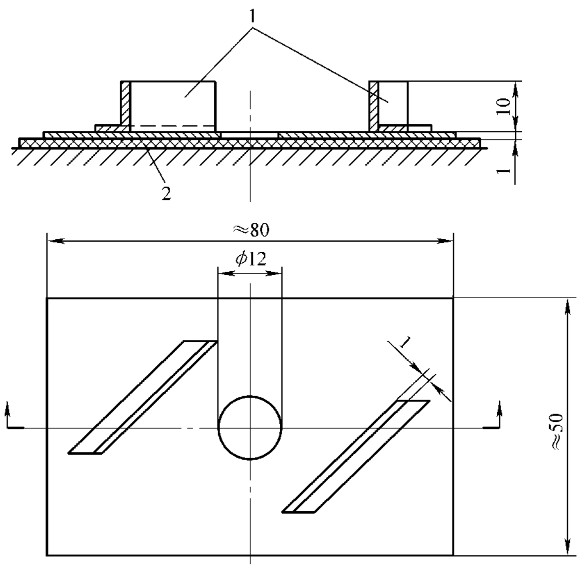



图 2-130　固定胶片的工具

1—操作人员手指保护装置　2—裁切的胶片

**3. 试样数量**

试验的试样应不少于 3 个。试样的数量应事先决定，使用 5 个试样的不确定度要小于用 3 个试样的试验。

**4. 样品和试样的调节**

（1）硫化与试验之间的时间间隔　对所有试验，硫化与试验之间的最短时间间隔应为 16h。

对非制品试验，硫化与试验之间的时间间隔最长为 4 星期，对于比对评估试验应尽可能在相同时间间隔内进行。

对制品试验，只要有可能，硫化与试验之间的时间间隔应不超过 3 个月。在其他情况下，从用户收到制品之日起，试验应在 2 个月之内进行。

（2）样品和试样的防护　在硫化与试验之间的时间间隔内，样品和试样应尽可能完全地加以防护，使其不受可能导致其损坏的外来影响，例如，应避光、隔热。

（3）样品的调节　在裁切试样前，来源于胶乳以外的所有样品，都应按 GB/T 2941 的规定，在标准实验室温度下（不控制湿度），调节至少 3h。在裁切试样前，所有胶乳制备的样品均应按 GB/T 2941 的规定，在标准实验室温度下（控制湿度），调节至少 96h。

（4）试样的调节　所有试样应按 GB/T 2941 的规定进行调节。如果试样的制备需要打磨，则打磨与试验之间的时间间隔应不少于 16h，但不应大于 72h。

对于在标准实验室温度下的试验，如果试样是从经调节的试验样品上裁取，无需作进一步的制备，则试样可直接进行试验。对需要进一步制备的试样，应使其在标准实验

室温度下调节至少 3h。

对于在标准实验室温度以外的温度下的试验，试样应按 GB/T 2941 的规定在该试验温度下调节足够长的时间，以保证试样达到充分平衡。

**5. 哑铃状试样的标记**

如果使用非接触式伸长计，则应使用适当的打标器按表 2-73 规定的试验长度在哑铃状试样上标出两条基准标线。打标记时，试样不应发生变形。

两条标记线应标在如图 2-130 所示的试样的狭窄部分，即与试样中心等距，并与其纵轴垂直。

**6. 试样的测量**

（1）哑铃状试样　用测厚计在试验长度的中部和两端测量厚度。应取 3 个测量值的中位数用于计算横截面面积。在任何一个哑铃状试样中，狭窄部分的 3 个厚度测量值都不应大于厚度中位数的 2%。取裁刀狭窄部分刀刃间的距离作为试样的宽度，该距离应按 GB/T 2941 的规定进行测量，精确到 0.005mm。

（2）环状试样　沿环状试样一周大致 6 等分处，分别测量径向宽度和轴向厚度。取 6 次测量值的中位数用于计算横截面面积。内径测量应精确到 0.1mm。按下列公式计算内圆周长和平均圆周长：

$$内圆周长 = \pi \times 内径$$

$$平均圆周长 = \pi \times (内径 + 径向宽度)$$

（3）多组试样比较　如果两组试样（哑铃状或环状）进行比较，每组厚度的中位数应不超出两组厚度总中位数的 7.5%。

## 2.25.2　试验设备

**1. 测厚计**

1）测量哑铃状试样的厚度和环状试样的轴向厚度所用的测厚计应符合 GB/T 2941 方法 A 的规定。

2）测量环状试样径向宽度所用的仪器，除压足和基板应与环的曲率相吻合外，其他与测厚计相一致。

**2. 锥形测径计**

1）经校准的锥形测径计或其他适用的仪器可用于测量环状试样的内径。

2）应采用误差不大于 0.01mm 的仪器来测量直径。支撑被测环状试样的工具应能避免使所测的尺寸发生明显的变化。

**3. 拉伸试验机**

1）拉伸试验机应符合 ISO 5893 的规定，具有 2 级测力精度。试验机中使用的伸长计的精度：1 型、2 型和 1A 型哑铃状试样和 A 型环形试样为 D 级；3 型和 4 型哑铃状试样和 B 型环形试样为 E 级。试验机应至少能在 100mm/min ± 10 mm/min、200mm/min ± 20mm/min 和 500mm/min ± 50mm/min 移动速度下进行操作。

2）对于在标准实验室温度以外的试验，拉伸试验机应配备一台合适的恒温箱。高于或低于正常温度的试验应符合 GB/T 2941 要求。

## 2.25.3 试验内容及结果表示

**1. 试验温度**

标准温度应为23℃。在亚热带地区也可以在27℃的温度下进行试验，但只能作为内部控制质量的暂用温度，仲裁鉴定试验的温度必须是23℃。

在进行对比试验时，任一个试验或一批试验都应采用同一温度。

**2. 哑铃状试样试验步骤**

1）将试样对称地夹在拉伸试验机的上、下夹持器上，使拉力均匀地分布在横截面上。根据需要，装配一个伸长测量装置。起动试验机，在整个试验过程中连续监测试验长度和力的变化，精度在±2%之内。

2）夹持器的移动速度：1型、2型和1A型试样应为500mm/min±50mm/min，3型和4型试样应为200 mm/min±20mm/min。

3）如果试样在狭窄部分以外断裂则舍弃该试验结果，并另取一试样进行重复试验。

4）采取目测时，应避免视觉误差。

5）在测拉断永久变形时，应将断裂后的试样放置3min，再把断裂的两部分吻合在一起，用精度为0.05 mm的量具测量吻合后的两条平行标线间的距离。拉断永久变形计算公式为

$$S_b = \frac{100(L_t - L_o)}{L_o}$$

式中 $S_b$——拉断永久变形（%）

$L_t$——试样断裂后，放置3min对起来的标距，单位为mm；

$L_o$——初始试验长度，单位为mm。

**3. 环状试样试验步骤**

将试样以张力最小的形式放在两个滑轮上。起动试验机，在整个试验过程中连续监测滑轮之间的距离和应力，精确到±2%。

可动滑轮的标称移动速度：A型试样应为500mm/min±50mm/min，B型试样应为100mm/min±10 mm/min。

**4. 拉伸性能的测定**

（1）拉伸原理　在动夹持器或滑轮恒速移动的拉伸试验机上，将哑铃状或环状标准试样进行拉伸。按要求记录试样在不断拉伸过程中和当其断裂时所需的力和伸长率的值。拉伸示意图如图2-131所示。

（2）哑铃状试样　按下面要求进行：

1）拉伸强度 $TS$ 按下式计算：

$$TS = \frac{F_m}{Wt}$$

式中 $TS$——拉伸强度，单位为MPa；

$F_m$——记录的最大力，单位为N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为mm。

2）断裂拉伸强度 $TS_b$ 按下式计算：

$$TS_b = \frac{F_b}{Wt}$$

式中　$TS_b$——断裂拉伸强度，单位为MPa；

$F_b$——断裂时记录的力，单位为N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为mm。

3）拉断伸长率 $E_b$ 按下式计算：

$$E_b = \frac{L_b - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$E_b$——拉断伸长率（%）；

$L_o$——初始试验长度，单位为mm；

$L_b$——断裂时的试验长度，单位为mm。

4）定伸应力 $S_e$ 按下式计算：

$$S_e = \frac{F_e}{Wt}$$

式中　$S_e$——定伸应力，单位为MPa；

$F_e$——给定应力时记录的力，单位为N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为mm。

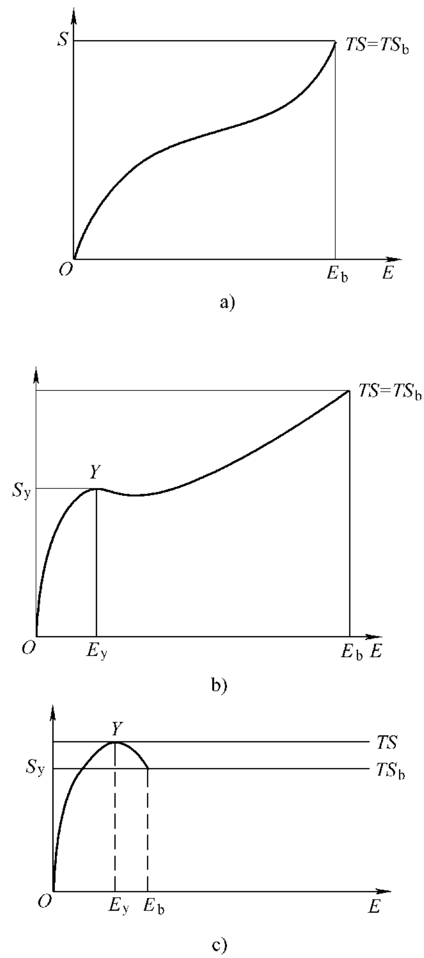



图2-131　拉伸示意图

a）Ⅰ型　b）Ⅱ型　c）Ⅲ型

$E$—伸长率　$S_y$—屈服点拉伸应力　$E_b$—拉断伸长率　$TS$—拉伸强度　$E_y$—屈服点伸长率　$TS_b$—断裂拉伸强度　$S$—应力　$Y$—屈服力

5）定应力伸长率 $E_s$ 按下式计算：

$$E_s = \frac{L_s - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$E_s$——定应力伸长率（%）；

$L_o$——初始试验长度，单位为mm；

$L_s$——定应力时的试验长度，单位为mm。

6）所需应力对应的力值 $F_e$ 按下式计算：

$$F_e = S_e Wt$$

式中　$F_e$——给定应力时记录的力，单位为 N；
$S_e$——定伸应力，单位为 N；
$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；
$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

7）屈服点拉伸应力 $S_y$ 按下式计算：

$$S_y = \frac{F_y}{Wt}$$

式中　$S_y$——屈服点拉伸应力，单位为 MPa；
$F_y$——屈服点时记录的力，单位为 N；
$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；
$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

8）屈服点伸长率 $E_y$ 按下式计算：

$$E_y = \frac{L_y - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$E_y$——屈服点伸长率（%）；
$L_o$——初始试验长度，单位为 mm；
$L_y$——屈服时的试验长度，单位为 mm。

（3）环状试样　按下面要求进行：

1）拉伸强度 $TS$ 按下式计算：

$$TS = \frac{F_m}{2Wt}$$

式中　$TS$——拉伸强度，单位为 MPa；
$F_m$——记录的最大力，单位为 N；
$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；
$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

2）断裂拉伸强度 $TS_b$ 按下式计算：

$$TS_b = \frac{F_b}{2Wt}$$

式中　$TS_b$——断裂拉伸强度，单位为 MPa；
$F_b$——断裂时记录的力，单位为 N；
$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；
$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

3）拉断伸长率 $E_b$ 按下式计算：

$$E_b = \frac{\pi d + 2L_b - C_i}{C_i} \times 100\%$$

式中　$E_b$——拉断伸长率（%）；
$L_b$——试样断裂时两滑轮的中心距，单位为 mm；
$C_i$——环状试样的初始内周长，单位为 mm；

$d$——滑轮的直径，单位为 mm。

4）定伸应力 $S_e$ 按下式计算：

$$S_e = \frac{F_e}{2Wt}$$

式中　$S_e$——定伸应力，单位为 MPa；

$F_e$——给定应力时记录的力，单位为 N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

5）给定伸长率对应于滑轮中心距 $L_e$ 按下式计算：

$$L_e = \frac{C_m E_s}{200} + \frac{C_i - \pi d}{2}$$

式中　$L_e$——给定伸长率对应于滑轮中心距，单位为 mm。

$E_s$——定应力伸长率（%）；

$C_m$——环状试样的初始平均圆周长，单位为 mm；

$C_i$——环状试样的初始内周长，单位为 mm；

$d$——滑轮的直径，单位为 mm。

6）定应力伸长率 $E_s$ 按下式计算：

$$E_s = \frac{\pi d + 2L_s - C_i}{C_m} \times 100\%$$

式中　$E_s$——定应力伸长率（%）；

$L_s$——给定应力时两滑轮的中心距，单位为 mm；

$C_m$——环状试样的初始平均圆周长，单位为 mm；

$C_i$——环状试样的初始内周长，单位为 mm；

$d$——滑轮的直径，单位为 mm。

7）定应力对应的力值 $F_e$ 按下式计算：

$$F_e = 2S_e Wt$$

式中　$F_e$——给定应力时记录的力，单位为 N；

$S_e$——定伸应力，单位为 MPa；

$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

8）屈服点拉伸应力 $S_y$ 按下式计算：

$$S_y = \frac{F_y}{2Wt}$$

式中　$S_y$——屈服点拉伸应力，单位为 MPa；

$F_y$——屈服点时记录的力，单位为 N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

9）屈服点伸长率 $E_y$ 按下式计算：

$$E_y = \frac{\pi d + 2L_y - C_i}{C_m} \times 100\%$$

式中　$E_y$——屈服点伸长率（%）；

$L_y$——屈服时的试验长度，单位为 mm；

$C_m$——环状试样的初始平均圆周长，单位为 mm；

$C_i$——环状试样的初始内周长，单位为 mm。

**5. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，试验计算结果保留 3 位有效数字。

## 2.26　硫化橡胶高温拉伸试验

硫化橡胶高温拉伸试验按照 HG/T 3868—2008《硫化橡胶　高温拉伸强度和拉断伸长率的测定》进行。

### 2.26.1　试样

硫化橡胶高温拉伸试样与硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸试样的制备方法、形状尺寸完全相同。

### 2.26.2　试验设备

1）拉力机应符合 HG/T 2369 的规定，其测力精度应为 B 级。拉伸试验机应配备一个高温箱。高温箱应符合 GB/T 2941 的要求。

2）裁刀和裁片机、测厚计、锥形测径计的要求与硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸试验要求相同。

### 2.26.3　试验内容及结果表示

**1. 试验温度**

优先由下列温度中选用一个或几个温度：

1）40℃、55℃、70℃、85℃、100℃、125℃。

2）150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃。

当试验温度在 100℃以下时允许偏差为 ±1℃，当试验温度在 100～200℃之间时允许偏差为 ±2℃，当试验温度超过 200℃时，允许偏差为 ±3℃。

**2. 试验步骤**

1）首先起动鼓风机再接通加热电源。

2）调整拉力机拉伸速度：①哑铃状试样，对于 1 型和 2 型试样，夹持器的速度应为 500mm/min ±50mm/min，对于 3 型和 4 型试样，速度应为 200mm/min ±20mm/min；②环状试样，对于 A 型试样，可动滑轮的移动速度应为 500mm/min ±50mm/min，对于 B 型试样，速度应为 100mm/min ±10mm/min。

3）根据试验所需的温度，调节温度自动控制装置。

4）当高温箱内的温度达到试验所需的温度且恒定后。将试样依次放置在高温箱内，快速关闭高温箱门，保证每个试样预热 10min。

5）将试样依次匀称地夹在或套在上、下夹持器上，并迅速关闭高温箱门，起动试验机，拉伸试样，直至拉断，记录试样拉断时的伸长率和负荷，使下夹持器恢复原位。如果试样在狭小平行部分之外发生断裂，则试验结果应予以舍弃，并应另取一试样重复试验。

6）作耐热系数试验时，常温与高温试验必须在同一台试验机上进行。

**3. 拉伸性能的测定**

（1）哑铃状试样　按下面方法进行：

1）拉伸强度 $TS$ 按下式计算：

$$TS = \frac{F_m}{Wt}$$

式中　$TS$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F_m$——记录的最大力，单位为 N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

2）拉断伸长率 $E_b$ 按下式计算：

$$E_b = \frac{L_b - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$E_b$——拉断伸长率（%）；

$L_o$——初始试验长度，单位为 mm；

$L_b$——断裂时的试验长度，单位为 mm。

（2）环状试样　按下面方法进行：

1）拉伸强度 $TS$ 按下式计算：

$$TS = \frac{F_m}{2Wt}$$

式中　$TS$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F_m$——记录的最大力，单位为 N；

$t$——试验长度部分厚度，单位为 mm；

$W$——裁刀狭窄部分的宽度，单位为 mm。

2）拉断伸长率 $E_b$ 按下式计算：

$$E_b = \frac{\pi d + 2L_b - C_i}{C_i} \times 100\%$$

式中　$E_b$——拉断伸长率（%）；

$L_b$——试样断裂时两滑轮的中心距，单位为 mm；

$C_i$——环状试样的初始内周长，单位为 mm；

$d$——滑轮的直径，单位为 mm。

3）耐热系数 $K$ 按下式计算：

$$K = \frac{\delta}{\delta_0}$$

式中　$\delta$——高温下的拉伸强度或拉断伸长率（%）；

$\delta_0$——常温下的拉伸强度或拉断伸长率（%）。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，试验计算结果保留 3 位有效数字。

## 2.27　硫化橡胶拉伸耐寒系数的测定

硫化橡胶拉伸耐寒系数的测定按照 HG/T 3867—2008《硫化橡胶　拉伸耐寒系数的测定》进行。

### 2.27.1　试样

1）硫化橡胶高温拉伸试样与硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸试样的制备方法、形状尺寸相同。优先选用 1 型试样，并在试样两端截去相等长度，使总长变为 42mm。

2）试样裁切方向与压延、压出方向一致。

3）试样数量应不少于 3 个。

### 2.27.2　试验设备

试验设备如图 2-132 所示。

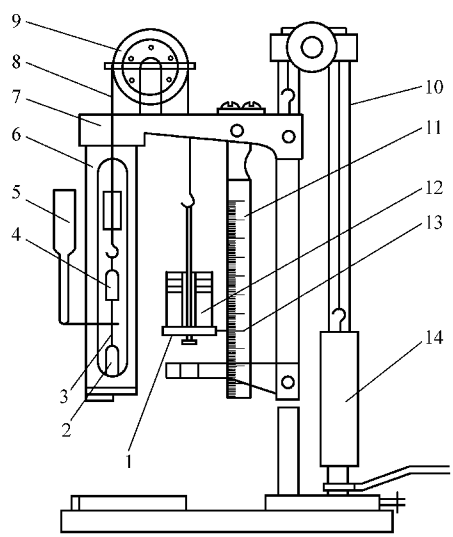



图 2-132　拉伸与测量装置

1—砝码盘　2—下夹持器　3—试样　4—上夹持器　5—温度计　6—硬质胶筒　7—支架
8—钢丝绳　9—滑轮　10—支柱　11—刻度尺　12—砝码　13—指针　14—平衡砣

1）上、下夹持器的工作面刻有防滑花纹，推荐采用齿形或菱形花纹。

2）砝码盘的质量应等于浸入传热介质中的上夹持器的质量。

3）测量用标尺的最小分度值应不大于 1mm。

4）钢丝绳应平直、柔韧。为了排除钢丝在拉伸时的伸长，应从测试值中减去同负荷的钢丝伸长值。

5）保温容器中盛有足够的乙醇，以保证试样被拉伸时上夹持器不露出液面。

6）采用最小分度值不大于 7℃ 的低温温度计测量试验介质的温度。推荐采用局浸内标式，浸入深度为 150mm 的低温温度计。试验时，温度计的温包应与试样位于同一水平位置。

## 2.27.3　试验内容及结果表示

**1. 试验温度**

推荐采用如下试验温度供选择：－10℃、－25℃、－40℃、－50℃、－55℃、－60℃、－70℃。若采用其他试验温度可按相关标准执行。

**2. 试验步骤**

1）在试样的工作部位印上两条距离为 25.0mm ± 0.5mm 的平行标线，测量试样标距内的厚度。

2）在 5s 内将试样拉伸至原标距的 145% ~155% 后松开，使试样在自由状态下停放 15 ~120min。

3）在试样上重新印上标线，按新标线把试样夹在上、下夹持器上，并将上夹持器系在通过滑轮的钢丝绳一端，下夹持器牢固地卡在硬质胶筒的底部中央。

4）将装好的试样与硬质胶筒一起浸入已调整好温度的保温容器中，使试样在 23℃ ±2℃ 的温度下调节 3 min，同时调整零点对准指针。

5）在仪器的砝码盘上于 1min 内加完适量的负荷，以保证试样 5min 内伸张到原标距的 90% ~110%，时间从加负荷时起计。

6）记录标尺上的指示值 $L_1$，除去负荷，取下带有试样的夹持器，停放 15 ~120min。

7）将试样重新装进硬质胶筒中，浸入已按规定调好温度的保温容器中，使试样在试验温度下（温度偏差为 ±1℃）调节 3min。同时调整零点对准指针。

8）在砝码盘上加上与 5）等量的负荷，作用 5min，时间从加负荷时起计。

9）记录标尺上的指示值 $L_2$。

10）在盛有传热介质（可采用乙醇）的保温容器中加入致冷剂（可采用固体二氧化碳或液态氮）以调整试验温度。为保证试验过程中温度均匀，在试样浸入致冷剂前应进行充分搅拌，但在试验过程中，建议不搅拌和添加致冷剂。

**3. 拉伸性能的测定**

拉伸耐寒系数 $K$ 按下式计算：

$$K = \frac{L_2}{L_1}$$

式中 $L_1$——试样在常温时施加负荷后的伸长值，单位为 mm；

$L_2$——试样在低温时同负荷作用下的伸长值，单位为 mm。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，试验计算结果保留 3 位有效数字。

## 2.28 硬质橡胶拉伸试验

硬质橡胶拉伸试验按照 HG/T 3849—2008《硬质橡胶　拉伸强度和拉断伸长率的测定》进行。

### 2.28.1 试样

1）硬质橡胶拉伸试样如图 2-133 所示，试样可以用铣刀加工，也可以用模型硫化，表面和侧面要求光滑平整。试样尺寸如表 2-75 所示。

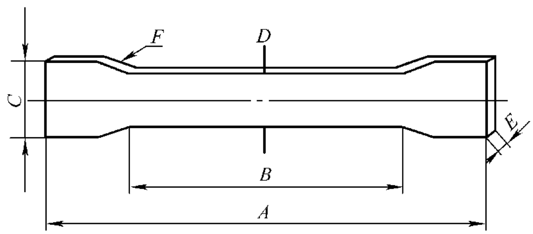



图 2-133　硬质橡胶拉伸试样

表 2-75　试样的尺寸

| 符号 | 名称 | 尺寸/mm |
|---|---|---|
| A | 总长度 | ≥150 |
| B | 测定长度 | 75.0 ±0.1 |
| C | 总宽度 | ≥20 |
| D | 测定宽度 | 12.5 ±0.3 |
| E | 厚度 | 3.0 ±0.1 |
| F | 半径 | 50 ±1 |

2）同一个试样的宽度变化应不大于 0.1mm，厚度变化应不大于 0.05mm。任何超出此范围的或出现其他不规则的或有缺陷的试样都不应使用。

3）常规试验应不少于 3 个试样，仲裁试验应不少于 5 个试样。

4）在狭窄平行部分以外裂断或有明显缺陷的试样数据作废，应重新取样测定。

### 2.28.2 试验设备

**1. 试验机**

1）试验机必须校准合格，同时保证作用力值在满标量程的 15% ~85% 范围内。

2）试验装置的移动速度必须保持恒定，并使施加的作用力在 30s ±15s 内达到最大值。

**2. 夹持器**

上、下夹持器由夹持表面对试样施加一均匀的压力，使试样夹紧。

**3. 基准标记器**

基准标记器应该有在同一平面上两条平行直线标志的光滑表面，表面宽度应在 0.05 ~0.08mm 之间。长度至少 15mm，标记面与侧面至少成 75°角。标记表面中心的距离应在所需距离的 0.05mm 之内。

**4. 标记器座**

标记器座应有一平坦不能弯曲表面（如硬木、玻璃或塑料板）。墨水对试样的性能不应有影响，并且与试样的颜色要呈鲜明的对比。

### 2.28.3　试验内容及结果表示

**1. 试验温度**

标准温度应为 23℃。在亚热带地区也可以在 27℃的温度下进行试验，但只能作为内部控制质量的暂用温度，仲裁鉴定试验的温度必须是 23℃。

在进行对比试验时，任一个试验或一批试验都应采用同一温度。

**2. 试验步骤**

1）试样尺寸的测量：试样的厚度和宽度用精确到 0.02mm 的测量仪器，在标线及其中间测量，取试样的宽度和厚度的最小值。需要测定拉断伸长率时，应使用基准标记器与标记器底座在试样狭窄部位打上两条间距为 75mm 的平行线，使两条线和试样纵轴垂直并与中心等距离。

2）将试样放入夹持器中，仔细地将其调节对称，以便使试样在横截面上的拉力分布均匀。用适当的匀速移动夹持器给试样施加拉力直至拉断为止，记下最大拉力。

3）在施加负荷时，应注意到标记器在试样上连续的记录测量标距，以便能在拉断瞬间记录所测量的标距，精确到 0.2mm。

**3. 拉伸性能的测定**

1）硬质橡胶拉伸强度按下式计算：

$$T = \frac{F}{bd}$$

式中　$T$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——试样拉断时最大负荷，单位为 N；

$b$——试样狭窄平行部分的宽度，单位为 mm；

$d$——试样的厚度，单位为 mm。

2）硬质橡胶拉断伸长率按下式计算：

$$E = \frac{L - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中　$E$——拉断伸长率（%）；

$L_o$——试样的初始标距，单位为 mm；

$L$——试样在拉断时标线间的距离，单位为 mm。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，试验计算结果保留到小数点后一位。

## 2.29　橡胶或塑料涂覆织物拉伸试验

橡胶或塑料涂覆织物拉伸试验按照 HG/T 2580—2008《橡胶或塑料涂覆织物　拉伸

强度和拉断伸长率的测定》进行。

## 2.29.1　试样

从每个样品上切取两组试样，一组沿纵向切取，另一组沿横向切取。每组不应少于5个试样，如果经有关方商定，要求更高的精密度，应试验更多的试样。

按照 HG/T 3050.2 从可使用的全宽和全长样品中选取试样，切取试样如图 2-134 所示。

每个试样应为 50mm ± 0.5mm 宽，长度应足以提供试验机夹具之间 200mm ± 1mm 的距离。如果伸长超过 75%，将长度减少到 100mm ± 1mm。

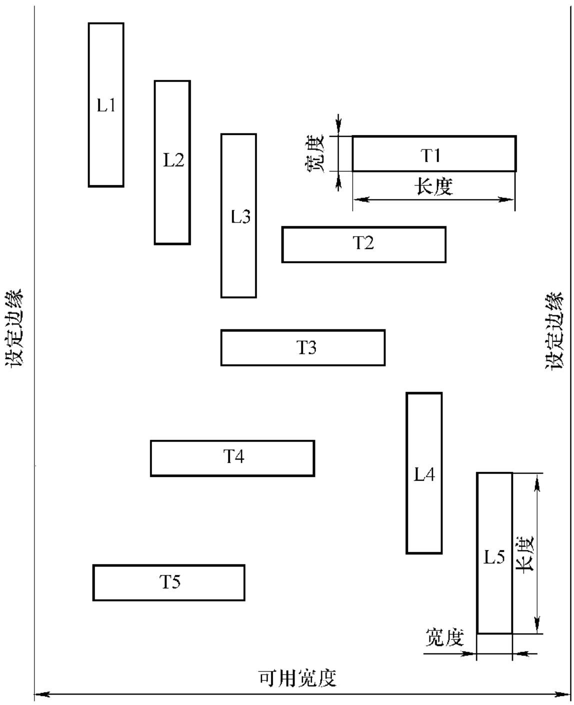



图 2-134　切取试样

L—纵向切取的试样　T—横向切取的试样

如果有机织支撑物，切取较宽的条，然后用磨削方法将宽度减少到 50mm ± 0.5mm。如果不适宜磨削，尽可能严格地顺着纱线沿试验方向上裁取试样。

如果由于纱线变形或存在肉眼看不见的支撑物而不可能严格顺着纱线切取，可使用另一种试验方法。

如果有机织支撑物，应沿着线圈纵向或线圈横向按试样最终尺寸切取。如果由于纱线变形存在肉眼看不见的支撑物而不可能切取适合的试样，可使用另一种试验方法。

对于无纺支撑物（如毛毡），应从纵向和横向的方向切取长方形试样。

如果试验要用湿试样进行，将试样在室温下在体积分数不超过 0.1% 的湿润剂水溶

液中完全浸湿 1h；如果另有规定，还可更长时间。用水彻底冲洗，从水中取出后 1min 之内进行试验。

## 2.29.2　试验设备

1）恒速拉伸试验机（CRE）。机器应装配读出和记录将试样拉伸到断裂所施加的力和相应的试样伸长的装置。为了确保每个试样在所使用的最大刻度的 15% ~85% 强度下断裂，试验机应装配带有若干刻度的强度指示器。设备的精度应为 ISO 7500-1 规定的 1 级。在机器所使用范围内任何点上指示或记录的最大力的误差应不超过 ±1%，指示或记录的夹具间距的误差不应超过 1mm。在试验的前 2s，夹持器之间距离增加的速度应均匀，误差在 5% 范围内。如果力和伸长用数据获得盘和软件记录，数据收集的频率应至少为 8/s。

2）夹持装置。机器的两个夹具的中心点应在一条拉伸线上，夹具的前端边缘应与拉伸线成直角，其夹持面应在同一平面上。夹具应能夹住试样而不使其滑动。它们应该设计得不损坏试样或降低其强度。可使用光滑平面的或刻有波纹状的夹具进行夹持。在夹具中使用适当的衬垫材料，如纸、皮革、塑料或橡胶，可在许多情况下避免夹持困难。试验时，若试样在夹钳处断裂或者滑落，试验结果往往可被废弃。为了获得真实的试验结果避免试样在夹具处断裂或滑动，可使用转塔夹具或者其他自锁装置替代普通平面夹具。当要求进行伸长测量时，可使用能随着试样上两个基准点移动的伸长仪进行伸长测量。使用这种夹具和伸长仪应在试验报告中加以报告。夹具应不小于试样的宽度，宽度至少为 60mm。

3）切割试样和将其磨削到要求宽度的设备。

4）试验前将试样浸泡在水中的设备。

## 2.29.3　试验内容及结果表示

**1. 调节和试验环境**

调节和试验所使用的环境应为 HG/T 2867 中规定的其中一种。样品应调节不少于 21h。如果试验结果是要代表制造和销售时一涂覆织物的性能，试验必须在制造之日 3 个月之内进行。

**2. 安装试样**

1）将试验的夹具间距设定为 200mm ± 1mm，也可根据试样情况，设定为 100mm ± 1mm。把试样夹持在固定的夹具上，使其纵轴通过每个夹具前缘的中心。

试样在预张力或松弛的状态下安装。当试样在预张力下安装时，检查预张力所产生的伸长不超过 5%。如果不能达到这种状态，试样以松弛状态安装。

2）施加下列相应的预张力：①200g/m$^2$ 以下（包括 200g/m$^2$）的涂覆织物 2N；②大于 200g/m$^2$ 到 500 g/m$^2$ 以下（包括 500g/m$^2$）的涂覆织物 5N；③大于 500g/m$^2$ 的涂覆织物 10N。

3）当试样以松弛状态安装时，起始点相当于 0.5N 的预张力，初始计量长度增加相应的伸长。

**3. 操作**

连接读出断裂强度和伸长的装置。除非有关方另有规定，使活动夹持装置以100mm/min ±10mm/min 的恒定速度移动，将试样拉伸到断裂点。每个试样重复这一程序。

**4. 滑动**

1）在试样不对称滑动或者滑动 2mm 的情况下，试验结果作废。

2）若试验结果废弃，可用替代试样重复试验。替代试样尽可能从与废弃试样相同的样品部位上裁取。

**5. 夹具处断裂**

1）在试样在距夹具面 5mm 之内断裂的情况下，试验结果作废。

2）若试验结果废弃，可用替代试样重复试验。替代试样尽可能从与废弃试样相同的样品部分上裁取。

**6. 湿试样试验**

从水中取出试样，将其放在两片吸水纸之间轻轻挤压，立刻进行试验。湿试验时施加标准预张力一半的力。

**7. 拉伸性能的测定**

1）拉伸最大力是指将试样拉伸到断裂点时所记录的最大的力，如图 2-135 所示。

2）拉断力是指断裂瞬间记录的拉伸力，如图 2-136 所示。

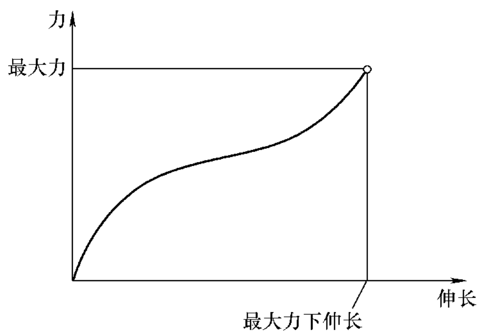



图 2-135　拉伸最大力

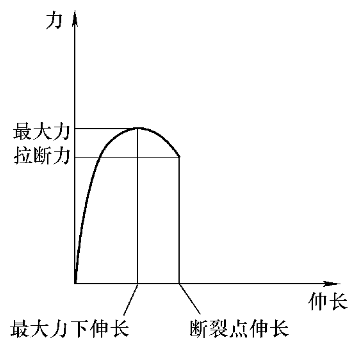



图 2-136　断裂点拉伸力

图 2-137 所示为涂覆织物的一个组分的断裂。典型的例子是：①在可拉伸的织物上有“刚性”聚合物层，聚合物层的断裂；②在强度小的拉伸性较差的织物或无纺织物上有拉伸性大的厚聚合物层，机织织物或无纺织物的断裂。

3）每个试样记录纵向和横向各 5 个试样的最大力和拉断力（拉断力必须记录，以便确认其与最大力是否有区别），并计算每个方向上最大力和拉断力的平均值。将最大力和拉断力的平均值四舍五入精确到 1N 或计算值的 1%。计算每种情况下的偏离系数，如果需要，计算平均值的置信界限。

4）记录每个方向各 5 个试样的最大力下伸长，精确到 15mm（如果最大力与拉断力不同），则记录拉断伸长。当施加预张力时，最大力下伸长和拉断伸长的值以夹具间

距离（200mm 或者 100mm）的百分数表示，或者用公称标距的百分数表示。从“松弛”向“拉伸”转变的应力-应变曲线上的点获取预张力值修正松弛安装试样的初始计量长度。

5）计算最大力下的伸长和拉断伸长的平均值。对这些平均值进行四舍五入，当平均值伸长不超过 8% 时精确到 0.2%，当平均值介于 8% ~50% 之间时精确到 0.5%，当平均值大于 50% 时精确到 1%。计算每种情况的偏离系数，如果需要，计算平均值的置信界限。

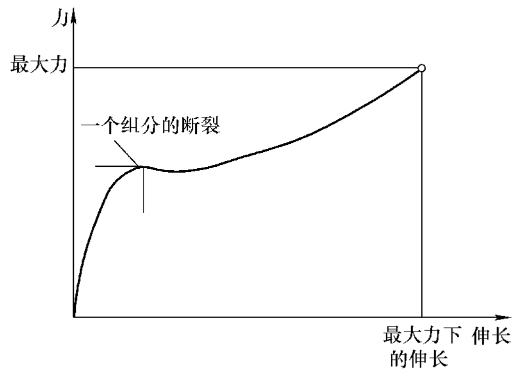



图 2-137　涂覆织物的一个组分的断裂

**8. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，试验计算结果保留 3 位有效数字。

## 2.30　高聚物多孔弹性材料拉伸试验

高聚物多孔弹性材料拉伸试验按照 GB/T 10654—2001《高聚物多孔弹性材料　拉伸强度和拉断伸长率的测定》进行。

### 2.30.1　试样

（1）取样的方向　如果产品表明多孔结构的主要方向（多孔的取向性），拉伸试验的试样应以使得它们的纵轴与多孔结构的取向垂直的方式裁取。如果不能这样裁取，应在试验报告中说明试样纵轴与多孔取向的位置。

（2）形状和尺寸　试样的横截面应是矩形，有或无表面皮膜，无可见的缺陷，拉伸试样应按图 2-138 用试样裁刀裁切，试样厚度为 10 ~15mm。

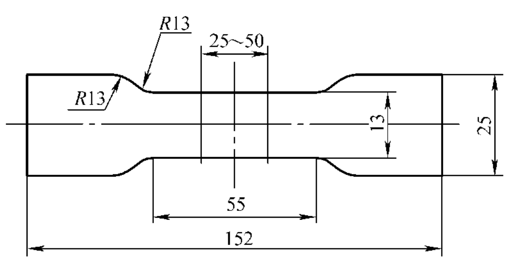



图 2-138　裁刀尺寸示意图

（3）试样数量　除另有规定外应提供 5 个试样进行试验。

（4）试样调节　试验材料在制造后的 72h 内不应进行试验。试验前，用于裁取试

样的材料应在以下环境中至少调节 16h：

1）23℃ ±2℃，相对湿度为 50% ±5%。

2）27℃ ±2℃，相对湿度为 65% ±5%。

## 2.30.2 试验设备

拉伸试验机应满足下列要求：

1）动力驱动夹持器的移动速率应是 500mm/min ±50mm/min，并始终保持一致。

2）拉伸试验机的精确度为 0.5%。

## 2.30.3 试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

按规定调节后，在被裁取试片部分的 5 个均匀分布点上测量材料的厚度，或者在每个试样裁片部分上测量 2 个点的厚度，应按 HB/T 3054 测量这些尺寸，且尺寸间相差应不大于 ±2%。

裁取试片并用两条标线标明标距，标线的标记卡应有两条平行的边界标线，两条标线间的距离最小为 25mm，最大为 50mm，测量时精确到 ±1%。

把试片放在试验机的夹持器中，小心地调到对称位置，使得拉伸均匀地分布在试样的横截面上。开机并记下试片断裂时最大的力（精确到 ±1%）和两条标线内侧之间的距离（精确到 ±1.25mm）。去掉标线外断裂的试片并继续试验直到获得 5 个满意的结果为止，应提供足够的材料以确保进行此重复试验。

进行此试验如同调节试验材料一样，应在同一温度、湿度条件下进行。

**2. 平均拉伸强度**

计算每个试片材料的平均厚度。根据所得的平均厚度和试片裁刀中间位置的固定宽度计算每个试片的平均初始横截面积。每个试片的平均拉伸强度用下式计算：

$$R = \frac{F}{S}$$

式中 $R$——平均拉伸强度，单位为 MPa；

$F$——最大拉断力，单位为 N；

$S$——平均初始横截面积，单位为 $mm^2$。

**3. 拉断伸长率**

拉断伸长率由下式计算：

$$A = \frac{L - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中 $A$——拉断伸长率（%）；

$L$——断裂时的标距，单位为 mm；

$L_o$——初始标距，单位为 mm。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，试验计算结果保留 3 位有效数字。

## 2.31　土工布及其有关产品宽条拉伸试验

土工布及其有关产品宽条拉伸试验按照 GB/T 15788—2005《土工布及其有关产品宽条拉伸试验》进行。

### 2.31.1　试样

**1. 取样**

（1）卷装的选择　对于每种待测的产品，取样数量由有关双方协定。除了试验有关要求外，所选卷装应无破损，卷装成原封不动状。

（2）裁取样品　在裁取样品前，应按相关试验标准获取试样有关数量、形状和其他任何要求的信息。卷装的头两层不应取做样品。在卷装上沿着垂直于机器方向（生产方向即卷装长度方向）的整个宽度方向裁取样品，样品要足够长，以获得所要求的试样数量。试样不应有损伤部分，故应避免在这些损伤部分取样，或裁取足够大的样品以获得所需要的试样数量。

**2. 试样准备**

1）在取样时和取样后，要注意确保样品在测试前其物理状态没有发生变化。例如，黏土防渗土工膜在取样时应保持一定的含水量。

2）如暂不裁取试样，应将样品保存在干燥、干净、避光处，防止受到化学物品侵蚀和机械损伤。样品可以被卷起，但不能折叠。GBR-R 样品既不能卷起也不能折叠。

3）用于每次试验的试样，应从样品中长度和宽度方向上均匀地裁取，且距样品边缘至少 100mm。

4）所裁取的试样还应均匀，不得有污垢、折痕、孔洞或其他在生产加工过程中产生的可视缺陷。

5）对同一项试验，除非试验标准中另有要求，否则应避免两个及以上的试样处在相同的纵向或横向位置上口。若不可避免（如窄幅卷装），应在试验报告中说明。

6）除需取附加试样，试样应沿着纵向和横向方向裁取。需要时标出试样的纵向，在样品上的纵向标记也需在试样上标出，或将试样分别按纵、横向独立放置，避免引起混淆。

7）应参照指定的试验标准准确裁取试样。试样在裁取时，可以在长度与宽度方向上预留一定的尺寸，调湿后再裁剪成规定尺寸的试样。

8）应根据样品上的标记来标识各个试样，以确保试样能被正确识别。

9）如果裁取试样时造成土工合成材料破碎，发生损失，则将所有脱落的碎片放到试样一起，直至进行试验。若不可避免且会影响试验结果，则应在试验报告中注明实际情况。

10）测试前，应将试样保存在干燥、干净、避光处，防止受到化学物品侵蚀和机械损伤。

**3. 试样尺寸**

制备每个试样至 200mm ± 1mm 的最终宽度，并有足够的长度以满足夹钳隔距 100mm。其长度方向与外加拉伸力的方向平行。当合适时，为控制滑移，可沿着试样的整个宽度，与试样长度方向垂直地画两条间隔 100mm 的标记线。

对于机织土工布，将每块试样剪切至约 220mm 宽，然后再从试样的两边拆去数目大致相等的边线以得到 200mm ± 1mm 的名义试样宽度。这有助于在试验期间保持试样的完整性。当试样的完整性不受影响时，可直接切成最终宽度。

对于土工格栅或土工布与土工格栅复合产品，每个试样至少为 200mm 宽，并具有足够的长度。试样除被夹钳握持住的节点或交叉组织外，应包含至少一排节点或交叉组织，如图 2-139 所示。对横向节距小于 75mm 的产品，在其宽度方向上至少有 5 个完整的拉伸单元。对于节距大于或等于 75mm 的产品，在其宽度方向上应当包含至少 2 个完整的拉伸单元。

如果本试验被用于接头/接缝强力的对比试验，试样宽度应最小为 200mm，且包含至少 5 个完整的拉伸单元。

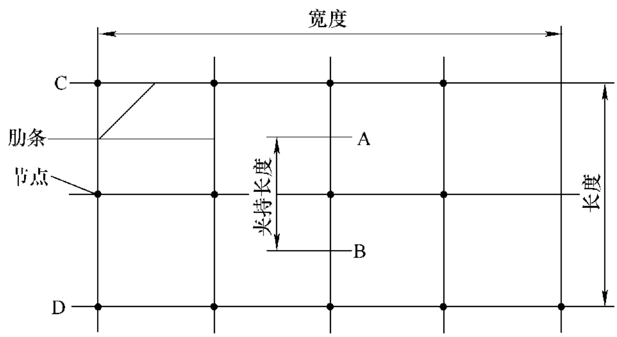



图 2-139　典型土工格栅

注：1. A 和 B 为用于伸长计而标记的参考点。
2. C 和 D 列上的节点和肋条在夹持试样时被夹具钳口握持。
3. 宽度≥200mm。
4. 夹持长度≥60mm，并应包括至少一排交叉组织。如需要，夹持长度应包含更多的交叉组织，直到超过 60mm，夹持长度应在肋条中点之间测量。
5. 离开节点至少 10mm 切割所有肋条。

如使用伸长计，标记点应标在试样的中排抗拉肋条的中心线上。两个标记点之间应至少间隔 60mm，并至少有一个节点或交叉组织，而且夹持长度应是格栅的数个完整节距。

对针织物、土工复合物或其他织物，用刀或剪子切取试样时会影响织物结构。在这种情况下可采用热切，并应记录在试验报告中。

当需要湿态最大负荷和干态最大负荷时，则剪取试样长度至少为通常要求的两倍。对每个试样编号后对折剪切成两块，一块用于测定干态最大负荷，另一块用于测定湿态最大负荷，这样使得每一对断裂试验是对含有同样纱线的试样进行的。

对于浸湿后收缩过大的土工布，拉伸强度应以湿态最大负荷与调湿后浸湿前的初始宽度（精确至 ±1mm）来测定。

## 2. 31. 2　试验设备

（1）拉伸试验仪　等速伸长型（CRE）拉伸试验仪，应符合 GB/T 16825 中的一级试验机要求。其夹具应有足够宽度，以握持试样的整个宽度，并采取适当的办法限制试样的滑移或损伤。对于大部分材料宜使用压缩式夹具。但对那些使用压缩式夹具出现过多的钳口断裂或滑移的材料，可采用绞盘夹具。对于选择夹钳面而言，最基本的是能限制试样（特别是对强力土工布）的滑移。图 2-140 所示为用于土工布拉伸试验的夹具示例。

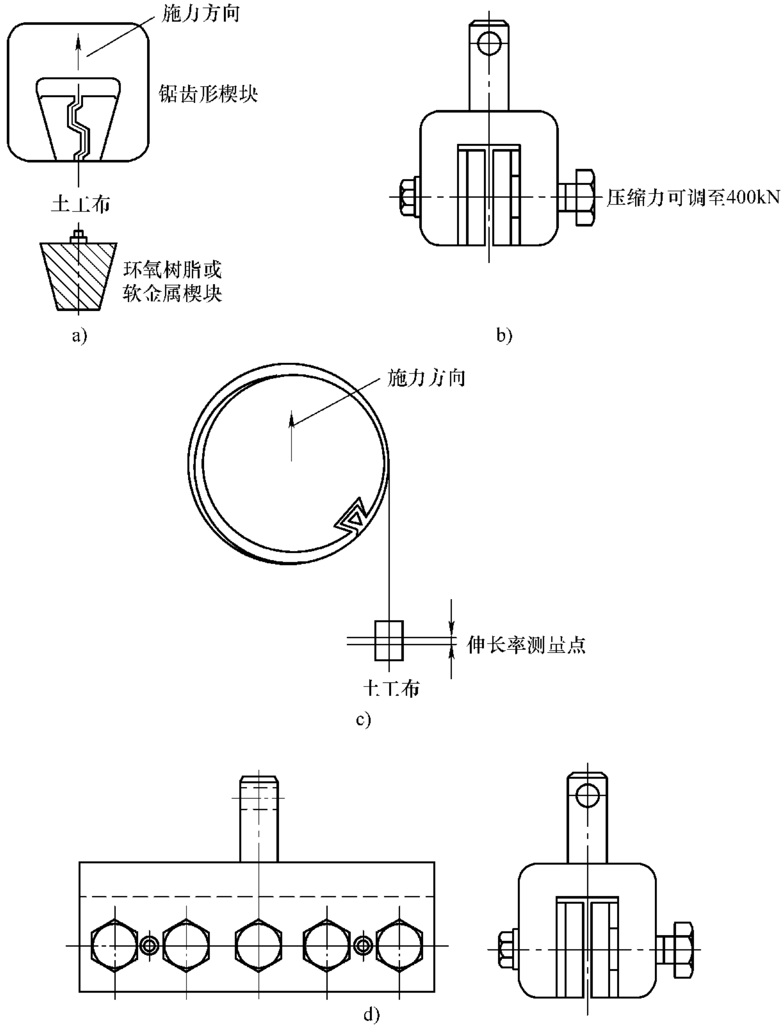
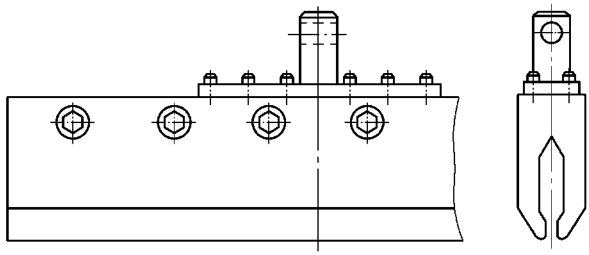



图 2-140　用于土工布拉伸试验的夹具示例

a）楔形夹具　b）压缩块夹具　c）绞盘夹具

d）适用于试验土工格栅的夹具Ⅰ



e)

图 2-140　用于土工布拉伸试验的夹具示例（续）
e）适用于试验土工格栅的夹具Ⅱ

（2）伸长计　能够测量试样上两个标记点间的距离，对试样无任何损伤或滑移，应注意保证测量结果确实代表了标记点的真实动程。伸长计包括力学、光学、红外或电学装置等。伸长计的精度应不超过 ±1mm。如果发现伸长计的应力-应变曲线出现不规则时，应舍弃该结果，对其他试样进行试验。

## 2.31.3　试验内容及结果表示

**1. 试样的调整**

1）在 GB/T 6529 规定的标准大气条件下调湿试样并进行试验。当试样在间隔至少 2h 的连续称重中质量变化不超过试样质量的 0.25% 时，可认为试样已经调湿。

2）如果能表明试验结果不受相对湿度的影响，则可不在规定的相对湿度条件下进行调湿和试验。

3）用于进行湿态试验的试样应浸入温度 20℃ ±2℃（或 23℃ ±2℃，或 27℃ ±2℃）的水中。浸泡时间应至少 24h，且足以使试样完全湿润，即在继续浸泡更长的时间后最大负荷或伸长率无显著差异。

4）为使试样完全湿润，也可以在水中加入不超过 0.05% 的非离子中性湿润剂。

**2. 设定拉伸试验机**

试验开始前，将夹具隔距调至 100mm ±3mm，土工格栅除外。选择试验机的负荷量程应使断裂强力在满量程负荷的 10% ~90% 之间。设定试验机的拉伸速度，使试样的伸长速率为隔距长度的 20%/min ±5%/min。若使用绞盘夹具，当每次试验开始时，应将纹盘中心隔距保持最小。使用绞盘夹具应记录在试验报告中。

**3. 夹持试样**

将试样对中地夹持在夹钳中。注意纵向和横向试验的试样长度与拉伸力方向平行。合适的方法是，将预先画好的横贯试验宽度且相隔 100mm 的两条标记线尽可能与上下夹钳口的边缘重合。对于湿态试样，在从水中取出后 3min 内进行试验。

**4. 安装伸长计**

在试样上相距 60mm 分别设定标记点（分别距试样中心 30mm），并固定伸长计，且不能对试样有任何损伤。确保试验中这些标记点不滑移。

**5. 测定拉伸性能**

开动拉伸试验机并连续运行至试样断裂，停机并回复至初始隔距位置。记录最大负荷，精确至满量程的0.2%，记录伸长率，精确至一位小数。每个方向至少试验5个试样。

根据试验中观测的试样情况，以及土工布特有的变异性，判定试验结果是否应剔除。如果试验过程中试样在夹钳中滑移，或如果在距夹钳口5mm以内的范围中断裂而其试验结果低于其他所有结果平均值的50%时，该试验值应剔除，另取一试样进行试验。

确定某些试样在接近夹钳边的地方断裂的确切原因是困难的。如果因夹钳损坏试样而产生钳口断裂，其结果应被剔除。但是，如果仅是由于试样中随机分布的薄弱部位，此结果是合理的。有时也许是施加负荷时因夹钳阻止试样在宽度上收缩，其附近区域产生应力集中，此时在夹钳口附近的断裂是难免的，应作为特殊试验方法的特性而接受。

对由特殊材料（例如玻璃纤维、碳纤维）制成的土工布试样，需要有特殊方法，以尽可能减少因夹钳所引起的损伤。如果试样在夹钳中滑移或超过1/4的试样断裂在距夹钳口边5mm范围内，可采取下列措施：

1）给夹钳加衬垫。

2）对夹在钳口面内的试样加以涂层。

3）修改钳口表面。

无论采用了何种修改措施，应在试验报告中注明修改的方法。

**6. 测定伸长率**

使用合适的记录装置测量在任一特定负荷下试样实际夹持长度的增加。

**7. 拉伸性能的测定**

（1）试验原理　将试样整个宽度夹持在拉伸试验机的夹具上，对试样进行拉伸直至试样断裂。试样的抗拉伸性能由试验机的记录装置记录并计算。对所有土工布及其有关产品，伸长速率固定为隔距长度的（20% ±5%）/min。典型负荷-伸长率曲线图如图2-141所示。

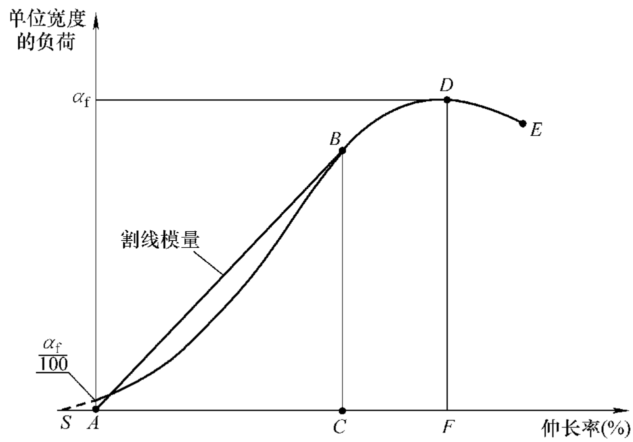



图2-141　典型负荷-伸长率曲线图

大多数土工布能用该方法进行试验。但对于特殊土工布，例如高强土工布、网状物或由玻璃纤维制成的土工布，有可能需要作一些技术修改，以防止它们在夹具中滑移或因被夹具握持而受损。

该方法采用的试样宽度比长度大，这是该方法与其他测定织物抗拉伸性能方法的根本区别所在。一些土工布在负荷作用下夹持长度范围内有收缩（颈缩）的趋势，较大的宽度降低了这些土工布的收缩影响，并可提供与所期望的土工布现场工作特性较为接近的指标。

各类土工布和土工格栅的基本试验所用试样宽度为200mm，名义夹持长度为100mm。当需要伸长率时，使用伸长计跟踪试样上的两个标记点来测量伸长。两个标记点位于与外加负荷相平行的试样对称轴上，间隔60mm（试样对称中心的每边30mm）。这个距离对于土工格栅可作修改，以便包括至少一排节点。

使用伸长计测定试样的伸长。如果校准试验表明夹钳位移和伸长结果之间无显著差异，则可以通过夹钳位移测量伸长。在此情况下，名义夹持长度就是上下夹钳的距离，固定为100mm。

（2）拉伸强度　将从拉伸试验机所获得的数据代入下式，计算每个试样的拉伸强度：

$$\alpha_f = F_f c$$

$$c = 1/B$$

$$c = N_m/N_s$$

式中　$\alpha_f$——拉伸强度，单位为kN/m；

$F_f$——记录的最大负荷，单位为kN；

$B$——试样的名义宽度，单位为m；

$N_m$——被试产品在1m宽内的拉伸单元数；

$N_s$——试样内的拉伸单元数。

对于非织造物、紧密机织物或类似材料，采用$c = 1/B$；对于稀松机织土工布、土工网状物、土工格栅或类似的松散结构材料，采用$c = N_m/N_s$。

（3）最大负荷下伸长率　记录每个试样的最大负荷下伸长率，用百分比表示（见图2-141中的$AF$），可按下式计算最大负荷下伸长率（%）：

$$\text{最大负荷下伸长率} = \frac{\text{最大负荷下的伸长} - \text{达到预负荷时的伸长}}{\text{隔距长度} + \text{达到预负荷时的伸长}} \times 100\%$$

（4）割线模量　确定在特定伸长率下的负荷（图2-141中$B$点），用下式计算在此特定伸长率的割线模量：

$$J_{sec} = F_c \times 100/\varepsilon$$

式中　$J_{sec}$——割线模量，单位为kN/m；

$F_c$——在伸长率$\varepsilon$下的测定负荷，单位为kN；

$\varepsilon$——特定的伸长率（%）。

**8. 试验结果数值的修约**

按GB/T 8170进行修约，拉伸强度和割线模量精确至3位有效数字，伸长率精确至1%。

## 2.32　土工布接头/接缝宽条拉伸试验

土工布接头/接缝宽条拉伸试验按照 GB/T 16989—1997《土工布接头/接缝宽条拉伸试验方法》进行。

### 2.32.1　试样

**1. 试样选择**

按 GB/T 13760 选择试样。

**2. 试样数量**

至少 5 块试样，每块试样含有接缝或接头。如果需要进行湿态试验，则另加 5 块试样。

**3. 试样制备**

如果样品无接缝，则剪取试样单元至少 10 个（每 2 个单元为一组），每个单元尺寸应满足制备试样后符合试样尺寸的测定。根据施工实际中接头/接缝的类型，或根据有关方面的协议制备试样。

**4. 试样尺寸**

1）从接合或缝合的样品中剪取试样，每块试样的长度不少于 200mm，且接头/接缝应在试样的中间部位，并垂直于所受力方向，如图 2-142 所示。每块试样最终宽度 200mm，按图 2-142 所示剪取试样，A 角为 90°。

2）对于机织土工布，在离开试样中心线 25mm 加上 $b/2$ 的距离处剪 25mm 长的切口，以便拆去边纱得到 200mm 的名义宽度。

3）对于土工格栅，试样宽度至少为 200mm，包含不少于 5 个拉伸单元，长度应大于 100mm 加接头宽度，接头两侧应含有至少一排节点或交叉组织，这些节点或交叉组织不应包括被夹钳夹持住的及形成接头的节点或交叉组织，剪去离开该排节点 10mm 处的肋条或交叉组织，如图 2-143 所示。试样两侧要做成接头的交叉组织至少应比被测试的拉伸单元宽 1 个节距，以利形成接头。

4）对于针织土工布、复合土工布或其他土工布，用刀剪切试样可能会影响其结构，此时可采用热切，但应避免损伤图 2-142 中 A 的部位。

**5. 方向特征**

试样制备时，两个接合/缝合在一起的单元应是同一方向（经向或纬向、纵向或横向），且接

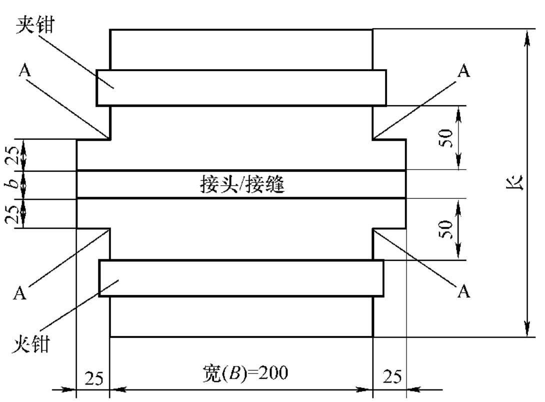



图 2-142　试样尺寸

头/接缝垂直于受力方向。

## 2.32.2　试验设备

1）等速伸长型（CRE）或等速牵引型（CRT）拉伸试验机，应具有 20mm/min 的伸长速率。

2）夹具应具有足够宽度以夹持试样的整个宽度（夹钳表面至少应与试样 200mm 同宽），并能适当限制试样的滑移或损伤，建议使用压缩锯齿形块式夹具。对于高强机织土工布，也可采用其他能限制试样在钳口处滑移和破裂的夹具。

3）伸裁试验采用 CRE 强力试验机。

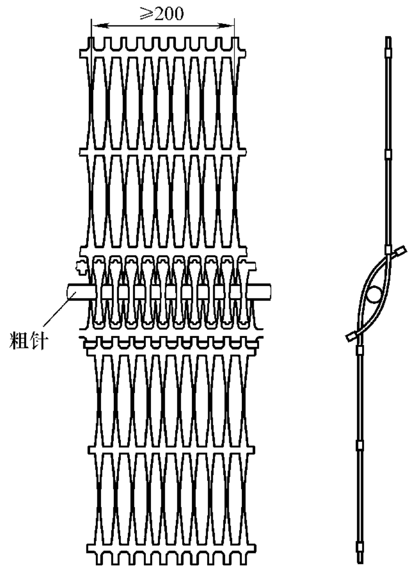



图 2-143　土工格栅试样图

## 2.32.3　试验内容及结果表示

**1. 试样调湿**

调湿和试验用标准大气应符合 GB/T 6529 规定的三级标准大气条件，温度为 20℃ ±2℃，相对湿度为 65% ±5%。对试样进行调湿，直至达到恒定质量。

如果能表明试验结果不受相对温度的影响，可不在规定相对温度条件下进行调湿和试验。

湿态试验时的试样应浸入湿度为 20℃ ±2℃ 的蒸馏水中。浸润时间应足以使试样完全润湿或者至少 24h。为使试样完全湿润，也可以在水中加入不超过 0.05%（质量分数）的非离子型润湿剂。

**2. 设定拉伸试验机**

调整夹钳间距为 100mm 加上接缝或接头宽度（精确至 3mm），土工格栅除外。选择负荷量程使拉伸力在满量程负荷的 30% ~90% 之间，设定拉伸速率为 20mm/min。

**3. 夹持试样**

将试样放入夹钳中心位置，长度方向与受力方向平行。夹好后在靠近钳口处，画一直线，以便观察试验过程中试样打滑。

对于湿态试样，从水中取出 3min 内进行试验。

**4. 测定接头/接缝拉伸强度**

开启强力机，直至接头/接缝或材料本身断裂。记录最大强力值，精确至小数点后一位。观察和记录断裂原因：

1）土工布断裂。

2）缝线断裂。

3）土工布与接头/接缝滑脱。

4）接缝开裂。

5）上述两种或多种组合。

6）其他。

如果试样是从图 2-142 中 A 点处开始断裂，或试样在夹具中打滑，则剔除该试验结果并另取一试样测试。

**5. 接头/接缝强度**

按下式计算纵（经）向或横（纬）向的接头/接缝强度：

$$S_f = F_f c$$

$$c = 1/B$$

$$c = N_m/N_s$$

式中　$S_f$——接头/接缝强度，单位为 kN/m；

$F_f$——记录的最大负荷，单位为 kN；

$B$——试样的名义宽度，单位为 m；

$N_m$——被试产品在 1m 宽内的拉伸单元数；

$N_s$——试样内的拉伸单元数。

对于非织造物、紧密机织物或类似材料，采用 $c = 1/B$；对于稀松机织土工布、土工网状物、土工格栅或类似的松散结构材料，采用 $c = N_m/N_s$。

**6. 接头/接缝效率**

按下式计算接头/接缝效率（其中无接头/接缝材料的拉伸强度按 GB/T 15788 测定，其方向应与接头/接缝试验相同）：

$$E = (\overline{S}_f/\overline{a}_f) \times 100\%$$

式中　$E$——接头/接缝效率（%）；

$\overline{S}_f$——平均接头/接缝强度，单位为 kN/m；

$\overline{a}_f$——无接头/接缝材料的平均拉伸强度，单位为 kN/m。

**7. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，修约至小数点后一位。

## 2.33　织物芯输送带全厚度拉伸试验

织物芯输送带全厚度拉伸试验按照 GB/T 3690—2009《织物芯输送带　全厚度拉伸强度、拉断伸长率和参考力伸长率　试验方法》进行。

### 2.33.1　试样

**1. 形状和尺寸**

试样的形状和尺寸如图 2-144 ~ 图 2-147 所示。

**2. 试样的切取方法**

输送带试样应在离开带边至少 50mm 且无接头的部位切取，纵向试样的纵向中心线应与带的纵向中心线平行，横向试样的横向中心线应与带纵向中心线垂直。试样的纵向边到从输送带切取的样品的任何一条边的距离均不小于 12mm。

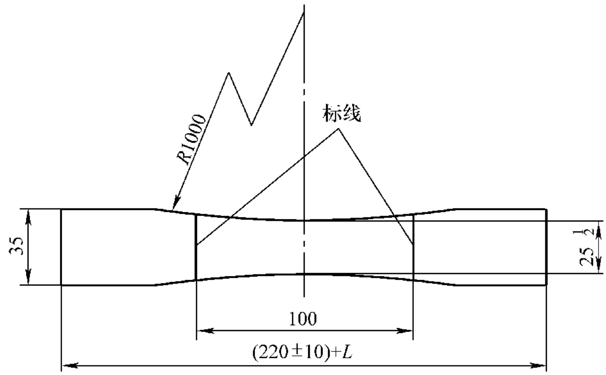



图 2-144　A 型试样
L—两个夹持器的长度（mm）

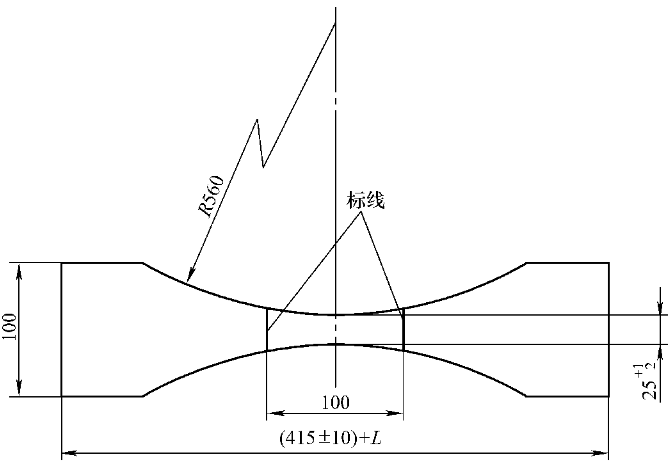



图 2-145　B 型试样
L—两个夹持器的长度（mm）

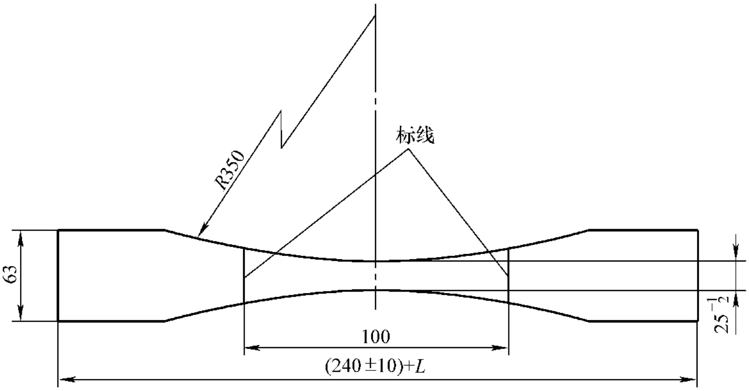



图 2-146　C 型试样
L—两个夹持器的长度（mm）

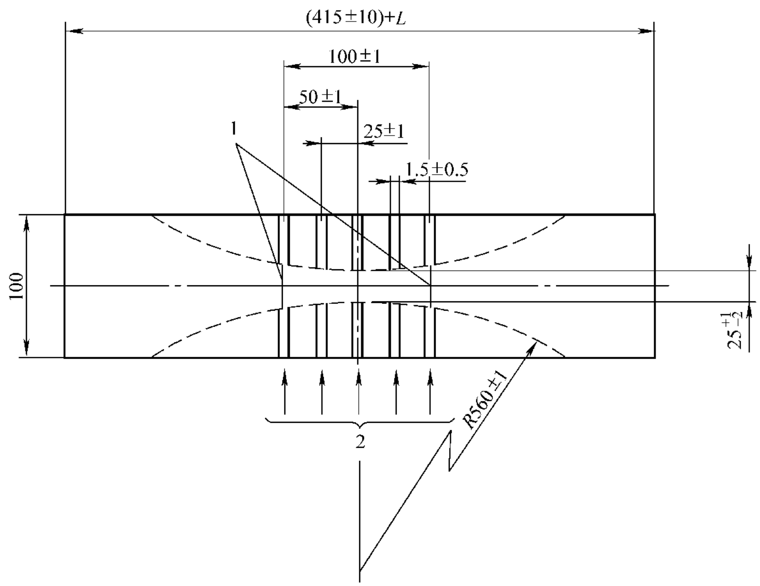



图 2-147　D 型试样

L—两个夹持器的长度（mm）　1—标线　2—横切经线的切割点

对 D 型试样，沿样品的每一纵向边选择 5 个点，按图 2-147 所示尺寸把这 5 个点连成一切割线，用电锯沿切割线在样品上切取试样。

图 2-147 所示的 D 型试样应限于拉伸强度大于 2000MPa 的输送带。

**3. 试样的制备**

在试样上与试样纵向中心线垂直，与试样中心等距地画两条标线，标距为 100mm。测量试样中部最窄处的宽度，即两标线间，测量用游标尺的刻度精确到 0.1mm。如果裁取的试样上下宽度不一致，则取上下宽度的算术平均值作为试样中部最窄处的宽度。

如果带的覆盖层很厚或厚度差异很大，为防止试样在夹持器中滑动，容许去除或减薄覆盖层后进行试验。

对一定类型的带结构，如果带中的织物线产生异常不等的应力分布，则会引起试样在夹持器中的系统滑动，得出错误的结果。在这种情况下，应使用不同形状的试样进行试验。

**4. 试样数量**

应从带的纵向上切取 3 个试样，需要时，应从带的横向上切取 3 个试样。

## 2.33.2　试验设备

**1. CRE 或 CRT 型拉伸试验机**

符合 ISO 7500-1 的规定且校准为 1 级，并能以恒定速度 100mm/min ± 10mm/min 连续拉伸试样。

**2. 器具**

伸长测定仪至少能测量 100mm，精度为 0.1mm 或更好。伸长测定仪能测量试样标

距的伸长，试验时能绘出曲线的伸长测定仪优先使用。

**3. 夹持器**

夹持器应能防止试样在整个拉伸试验过程中发生任何滑动。

### 2.33.3 试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

将试样对称地夹在拉伸试验机的两夹持器上，目的是使纵向中心线、夹持器中心线与拉力的作用线方向一致。如果使用伸长测定仪，将伸长测定仪的两个侧头置于试样标线上。

试验开始前夹持器内侧之间的距离应为：

1）对于 A 型试样：220mm ± 10mm。

2）对于 B 型试样和 D 型试样：415mm ± 10mm。

3）对于 C 型试样：240mm ± 10mm。

在试验开始时预加在试样上的负荷应不超过公称拉伸强度的 0.5%。

起动试验机以恒定速度 100mm/min ± 10mm/min 持续拉伸试样，对从带的纵向切取的试样，当拉力达到参考力值时，记录标距的增加量。继续试验直到拉力记录装置达到最大值，或者直到试样断裂，或者直到显而易见地发生织物断裂为止，记录该最大力和在该力时标距的增加量。

如果断裂不发生在试样的两标线间或者试验过程试样在夹持器间发生滑动，就应放弃获得的任何试验结果并重新换一个新试样试验。

**2. 拉断伸长率**

按下式计算 3 个纵向试样的每一拉断伸长率 $A$（%）：

$$A = \frac{L - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中 $L_o$——初始标距（即在两标线之间的距离），单位为 mm；

$L$——拉断时的标距，单位为 mm。

**3. 参考力伸长率**

按下式计算 3 个纵向试样的每一参考力伸长率 $A_R$：

$$A_R = \frac{L_R - L_o}{L_o} \times 100\%$$

式中 $L_o$——初始标距（即在两标线之间的距离），单位为 mm；

$L_R$——拉伸至参考力时的标距，单位为 mm。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，修约至小数点后一位。

## 2.34 碳纤维复丝拉伸试验

碳纤维复丝拉伸试验按照 GB/T 3362—2005《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》

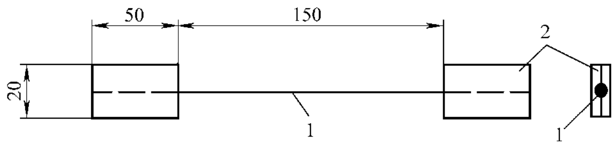
进行。

## 2.34.1　试样

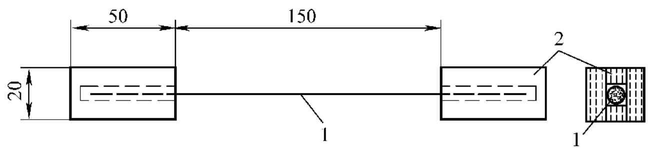
**1. 试样数量、形状及尺寸**

1）每组试验测量 10 个试样，有效试样应不少于 6 个。

2）测定碳纤维复丝拉伸性能用试样的形状及尺寸如图 2-148 所示。




a)




b)

图 2-148　试样的形状及尺寸

a）1K、3K 碳纤维复丝试样　b）6K、12 K 碳纤维复丝试样

1—碳纤维复丝试样　2—加强片

**2. 试样制备**

1）试样由碳纤维复丝浸渍环氧树脂胶液制成。

2）碳纤维复丝在浸胶前应预先按规定进行状态调节。

3）碳纤维复丝可用手工法或机器法浸胶。

4）1K、3K 碳纤维复丝试样，按图 2-148a 贴加强片，加强片为 0.2～0.4mm 厚的纸板。6K、12K 碳纤维复丝试样，按图 2-148b 粘贴加强片，加强片为 1～1.5mm 厚的纸板或金属板。可用任何室温固化的粘合剂粘贴加强片。

**3. 试样外观和含胶**

1）试样应均匀浸胶，光滑，平直，无缺陷。

2）由复丝浸胶制成的试样，应控制树脂质量分数在 35%～50%。

## 2.34.2　试验设备

试验机按 GB/T 1446—2005 中的规定。

引伸计重量应不影响测量精度，其测量精度应符合 GB/T 1446—2005 中的规定。

夹具与试验机相连时，要确保试样受拉时对中。

鼓风干燥箱要有足够的空间，能加热到需要的温度，使框架上的浸胶纤维固化，温度控制精度 ±20℃。

## 2.34.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）测量合格试样在加强片之间的试样长度，精确到0.5mm。

2）设置所用数据记录或采集设备的速度。

3）试样装入试验机的夹头，要求复丝和夹头的加载轴线相重合。

4）对试样施加初始载荷（约为破坏载荷的5%），检查并调整试样及应变测量仪表，使系统处于正常工作状态。加载速度为1～20mm/min，仲裁试验加载速度为2mm/min。

5）起动试验机和数据记录或采集设备，测试试样直至破坏。记录破坏载荷（或最大载荷），以及试样的破坏形式。

6）若试样出现以下情况应予以作废：①试样破坏在明显内部缺陷处；②试样破坏在夹具内或试样断裂处离夹紧处的距离小于10mm。

7）同批有效试样不足6个时，应重新进行试验。

**2. 拉伸性能的测定**

1）复丝拉伸强度按下式计算：

$$\sigma_t = \frac{F\rho_f}{t} \times 10^{-6}$$

式中　$\sigma_t$——拉伸强度，单位为MPa；

$F$——破坏载荷，单位为N；

$\rho_f$——复丝的密度，单位为$kg/m^3$；

$t$——复丝的线密度，单位为kg/m。

2）拉伸弹性模量按下式计算：

$$E_t = \frac{\Delta F\rho_f}{t} \times \frac{L}{\Delta L} \times 10^{-9}$$

式中　$E_t$——拉伸弹性模量，单位为GPa；

$\Delta F$——由应力-应变曲线初始直线段上截取的载荷值，单位为N；

$\rho_f$——复丝的密度，单位为$kg/m^3$；

$t$——复丝的线密度，单位为kg/m；

$L$——加强片之间的试样长度，单位为mm；

$\Delta L$——加强片之间的试样长度对应于$\Delta P$的变形增量，单位为mm。

3）复丝的断裂伸长率按下式计算：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_b}{L} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon_t$——断裂伸长率（%）；

$L$——加强片之间的试样长度，单位为mm；

$\Delta L_b$——断裂伸长，单位为mm。

**3. 试验结果数值的修约**

按GB/T 8170进行修约，修约至小数点后一位数字。

## 2.35　精细陶瓷室温拉伸试验

精细陶瓷室温拉伸试验按照 GB/T 23805—2009《精细陶瓷室温拉伸强度试验方法》进行。

### 2.35.1　试样

**1. 形状和尺寸**

试样的形状和尺寸取决于很多因素，包括拉伸试验目的本身、夹具、待测陶瓷制品的形状和尺寸。因此，各种不同的形状和尺寸可能被选用。形状和尺寸的确定应首先保证标距区受到均匀的拉应力。同时，应防止由于应力集中造成标距区外部意外断裂。标距区横截面积应一致，尺寸误差应小于 ±0.5%。常用的试样形状和尺寸如图 2-149 所示。

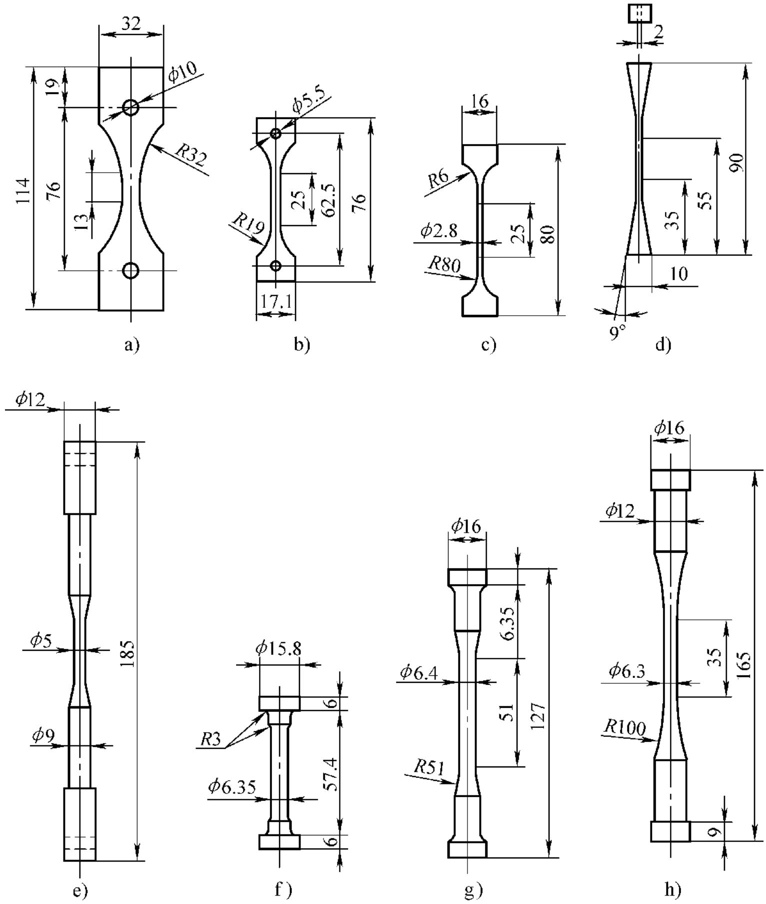



图 2-149　常用的试样形状和尺寸

a）A 型试样　b）B 型试样　c）C 型试样　d）D 型试样　e）E 型试样　f）F 型试样　g）G 型试样　h）H 型试样

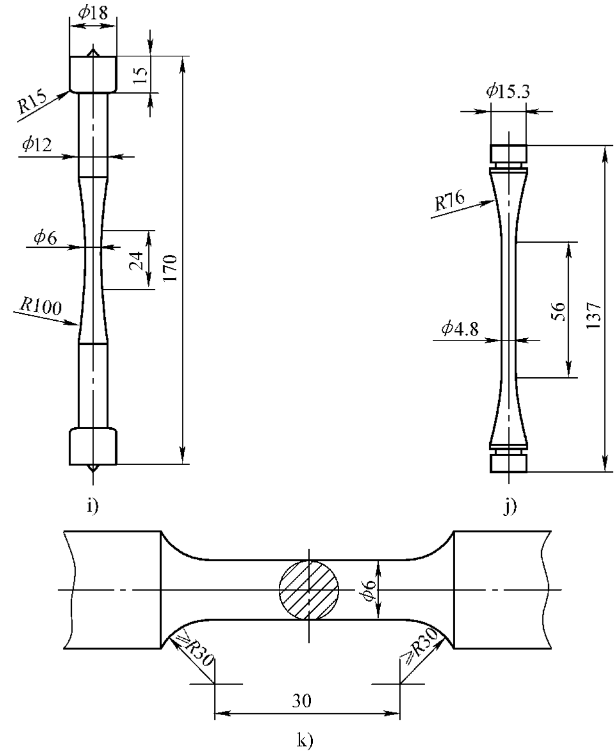



图 2-149　常用的试样形状和尺寸（续）

i）I 型试样　j）J 型试样　k）K 型试样

**2. 试样制备**

标距区的平均表面粗糙度 $Ra$ 为 0.2～0.4μm（纵向测量），以避免表面缺陷造成的断裂。建议最后一道研磨沿着试样纵向，以保证磨痕平行于拉伸应力方向（需要确定磨削方法对试验的影响时除外）。应仔细贮存和保管加工好的试样，避免造成损伤。

**3. 试样数量**

通常需要 10 个试样以得到平均测试结果。如果需得到韦伯模数和特征强度等强度分布参数，则需要 30 个以上的试样。对标距区外断裂的试验不应用于计算平均值和标准偏差，但可当做截尾试验用于韦伯统计的计算。

## 2.35.2　试验设备

1）试验机应达到 GB/T 16825.1 规定的 1 级准确度。

2）可使用不同种类的夹具，以尽量保证试样受到单向载荷。

## 2.35.3　试验内容及结果表示

**1. 试样尺寸的测量**

应对每个试样标距区选取至少 3 个横截面，测量直径或厚度以及宽度，精确到

0.02mm。多次测量结果取平均值用于计算横截面积。

**2. 轴向对中**

1）3～4 个应变片等距放置在两横截面间的圆周上。应变片面应对称地放在标距区轴向中点，并相距至少 3/4 标距区长。当标距区长度不足以放置两个应变片面时，使用一个面。这种情况下，应变片应位于标距区的轴向中点部分。当应变片装好后，应变片轴向应与应力轴向一致，偏离不能超过 2°。

2）理想情况下，应对每个试验试样进行对中校验。但是，如果这样的条件不可能或者达不到，可以使用有固定应变片的模拟试样，模拟试样与试样有完全相同的形状。建议模拟试样和实际试样材料也相同。

3）使用夹具固定试验试样，加载到预期断裂一半的载荷水平，测量应变量，采用下式计算弯曲度：

$$B = 2 \times \frac{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2]^{1/2}}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4} \times 100\%$$

$$B = 2 \times \frac{[\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^3 - \varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_2\varepsilon_3 - \varepsilon_3\varepsilon_1]^{1/2}}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3} \times 100\%$$

式中　$B$——弯曲度（%）；

$\varepsilon_1$、$\varepsilon_2$、$\varepsilon_3$、$\varepsilon_4$——应变片的应变读数。

4）已经进行对中校验的每个试样，在预期断裂应变一半时，弯曲率不应超过 7.5%。当试验系统使用固定应变片的模拟样品进行对中校验时，弯曲率应不超过 5%。

5）至少应在每个试验组试验开始和结束时进行校验，建议对所有试样进行检定。

6）不要把应变片置于过于接近试样标距区内几何形状变化处，以避免造成应变集中和不准确的测量。

**3. 试验模式和速率**

采用载荷控制、位移控制以及应变控制模式进行试验。推荐采用足够快的试验速率以使达到断裂的时间能够少于 10s，以尽量减少周围环境影响并得到本征拉伸强度。如果需要评估试验速率影响，可采用较低的速率。应记录所有试验的试验模式和加载速率。

最常用的试验模式是位移控制。在这种情况下，机架移动速度宜大于 0.5mm/min。对于载荷控制，推荐加载速率大于 20MPa/s。

**4. 拉伸性能测定**

按下式计算拉伸强度：

$$R_m = \frac{F_m}{A}$$

式中　$R_m$——拉伸强度，单位为 MPa；

$F_m$——最大拉伸载荷，单位为 N；

$A$——横截面积，单位为 $mm^2$。

**5. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，修约至小数点后一位数字。

# 第 3 章　材料硬度测定试验

## 3.1　材料硬度相关知识

**1. 硬度及硬度试验的定义**

硬度是指材料对压入塑性变形、划痕、磨损或切削等的抗力，是材料在一定条件下抵抗硬物压入其表面的能力。

硬度试验是应用最广泛的力学性能试验，根据受力方式，可分为压入法和刻划法。在压入法中，按照加力速度不同又可分为静态力试验法和动态力试验法。通常所采用的布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等均属于静态力试验法，肖氏硬度、里氏硬度和锤击布氏硬度等属于动态力试验法。各种不同硬度试验方法适用范围如表 3-1 所示。

**表 3-1　不同硬度试验方法适用范围**

| 硬度测量方法 | 适　用　范　围 |
| --- | --- |
| 布氏硬度试验 | 测量晶粒粗大且组织不均的零件,对成品件不宜采用。钢铁件的硬度检验中,现已逐渐采用硬质合金球压头测量退火件、正火件、调质件、铸件和锻件的硬度 |
| 洛氏硬度试验 | 批量、成品件及半成品件的硬度检验。对晶粒粗大且组织不均的零件不宜采用。A 标尺适于测量高硬度淬火件、较小与较薄件的硬度,以及具有中等厚度硬化层零件的表面硬度。B 标尺适于测量硬度较低的退火件、正火件及调质件。C 标尺适于测量经淬火回火等处理零件的硬度,以及具有较厚硬化层零件的表面硬度 |
| 表面洛氏硬度试验 | 测量薄件、小件的硬度,以及具有薄或中等厚度硬化层零件的表面硬度。钢铁件硬度检验中一般用 N 标尺 |
| 维氏硬度试验 | 钢铁件硬度检验中,试验力一般不超过 294. 2N。主要用于测量小件、薄件的硬度,以及具有浅或中等厚度硬化层零件的表面硬度 |
| 小载荷维氏硬度试验 | 测量小件、薄件的硬度,以及具有浅硬化层零件的表面硬度。测定表面硬化零件的表层硬度梯度或硬化层深度 |
| 显微维氏硬度试验 | 测量微小件、极薄件或显微组织的硬度,以及具有极端或极硬硬化层零件的表面硬度 |
| 肖氏硬度试验 | 主要用于大件的现场硬度检验,例如轧辊、机床面、重型构件等 |
| 钢的锉刀硬度检验 | 形状复杂零件、大件等的现场硬度检验。批量零件的 100% 硬度检验。被检面的硬度应不低于 40HRC |
| 努氏硬度试验 | 实际检验中,试验力一般不超过 9. 807N。主要用于测量微小件、极薄件或显微组织的硬度,以及具有极薄或极硬硬化层零件的表面硬度 |
| 里氏硬度试验 | 大件、组装件、形状较复杂零件等的现场硬度检验 |
| 超声硬度试验 | 大件、组装件、形状较复杂零件、薄件、渗氮件等的现场硬度检验 |
| 锤击式布氏硬度试验 | 正火、退火或调质处理大件及原材料的现场硬度检验 |

**2. 硬度试验常用术语**

（1）布氏硬度（HBW）　材料抵抗通过硬质合金球压头施加试验力所产生永久压

痕变形的度量单位。

（2）努氏硬度（HK）　材料抵抗通过金刚石菱形锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

（3）肖氏硬度（HS）　应用弹性回跳法将撞销（具有尖端的小锥，尖端上常镶有金刚石）从一定高度落到所测试材料的表面上而发生回跳，用测得的撞销回跳的高度来表示的硬度。

（4）洛氏硬度（HR）　材料抵抗通过硬质合金，或对应某一标尺的金刚石圆锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

（5）维氏硬度（HV）　材料抵抗通过金刚石正四棱锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位。

（6）里氏硬度（HL）　用规定质量的冲击体在弹性力作用下以一定速度冲击试样表面，冲头在距试样表面 1mm 处的回弹速度与冲击速度的比值计算的硬度值。

（7）标准块　用于压痕硬度计间接检验、带有检定合格的压痕值的标准块状物质。

## 3.2　金属材料洛氏硬度试验

金属材料洛氏硬度试验按照 GB/T 230.1—2009《金属材料　洛氏硬度试验　第 1 部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺)》、GB/T 230.2—2012《金属材料　洛氏硬度试验　第 2 部分：硬度计（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）的检验与校准》和 GB/T 230.3—2012《金属材料　洛氏硬度试验　第 3 部分：标准硬度块（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）的标定》进行。

### 3.2.1　试样

1）试样表面应光滑平坦，无氧化皮及外来污物，尤其不应有油脂。

2）试样的制备应使受热或冷加工等因素对表面硬度的影响减至最小，尤其对于残余压痕深度浅的试样应特别注意。

3）试验后试样背面不应出现可见变形。

4）试样表面粗糙度 $Ra$ 不大于 1.6μm。在作与压头粘结的活性金属的硬度试验时，例如钛，可以使用某种合适的油性介质（例如煤油)。使用的介质应在试验报告中注明。

5）对于用金刚石圆锥压头进行的试验，试样或试验层厚度应不小于残余压痕深度的 10 倍；对于用球压头进行的试验，试样或试验层的厚度应不小于残余压痕深度的 15 倍。洛氏硬度与试样最小厚度的关系如图 3-1 所示。

### 3.2.2　试验设备

**1. 洛氏硬度计**

洛氏硬度计可分为手动洛氏硬度计、电动洛氏硬度计、数显洛氏硬度计、表面类洛氏硬度计、光学类洛氏硬度计和加高型洛氏硬度计。手动洛氏硬度计（见图 3-2）操作

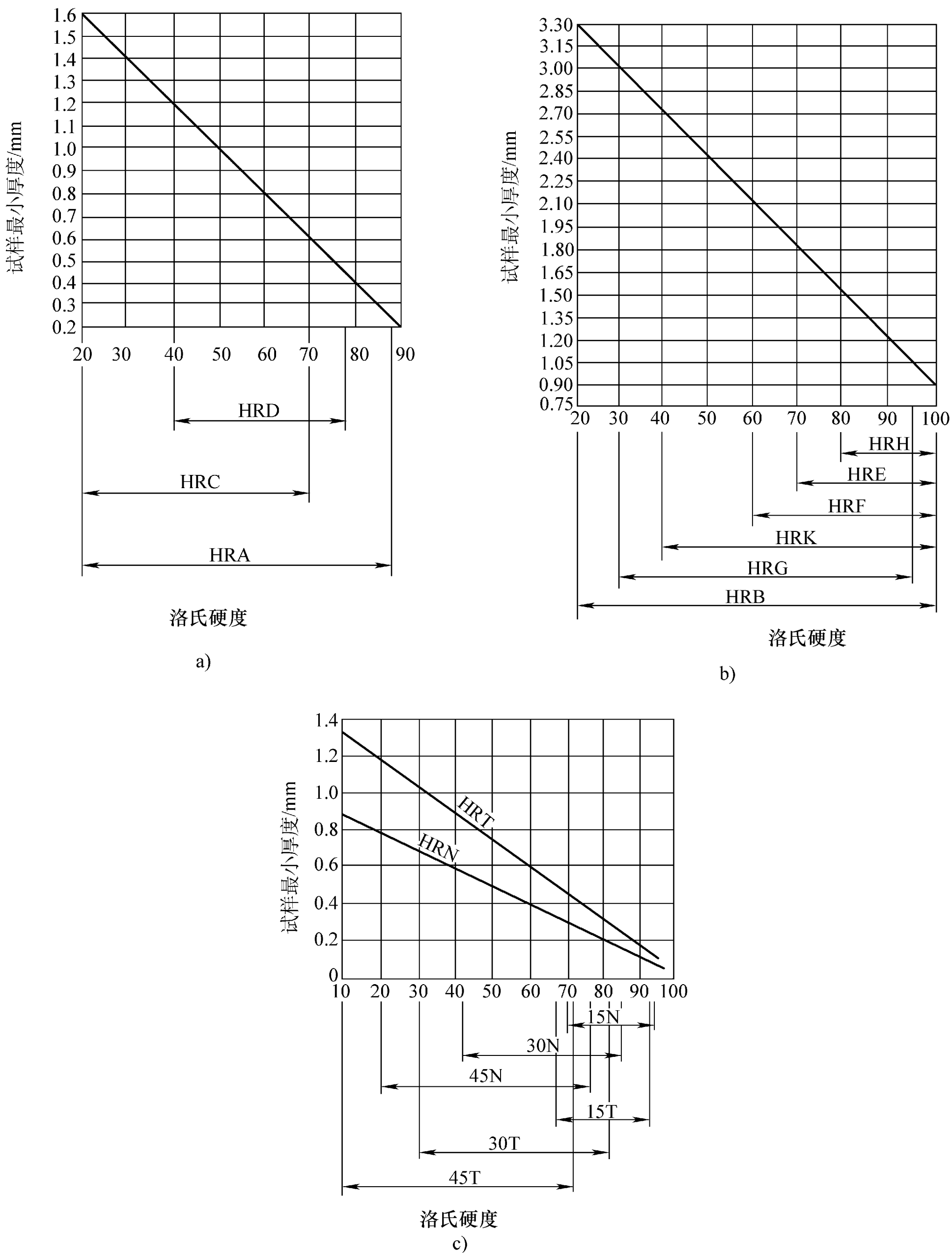



图 3-1　洛氏硬度与试样最小厚度关系

a）用金刚石圆锥压头试验（A、C 和 D 标尺）

b）用球压头试验（B、E、F、G、H 和 K 标尺）　c）表面洛氏硬度试验（N 和 T 标尺）

简单，测量迅速，可在指示表上直接读取硬度值，工作效率高，是最常用的洛氏硬度计。由于试验力较小，压痕也小，特别是表面洛氏硬度试验的压痕更小，对大多数工件的使用无影响，可直接测试成品工件，初试验力的采用，使得试样表面轻微的平面度误差对硬度值的影响较小，非常适于在工厂使用，适于对成批加工的成品或半成品工件进行逐件检测。该试验方法对测量操作的要求不高，非专业人员容易掌握。



图3-2　手动洛氏硬度计

**2. 压头**

1）金刚石圆锥压头锥角为120°，顶部曲率半径为0.2mm，并符合GB/T 230.2的要求。

2）硬质合金球压头的直径为1.5875mm或3.175 mm，并符合GB/T 230.2的要求。

## 3.2.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在10～35℃的温度下进行。对于温度要求严格的试验，应控制在23℃±5℃之内。

2）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，以避免试样产生位移。

3）试验过程中，硬度计应避免受到冲击和振动。

4）每个试样上的试验点数不少于4点，第1点不计。

5）在大量试验前或距前一试验超过24h，以及压头或支承台移动或重新安装后，均应进行检定，上述调整后的第一次试验结果不作为正式数据。

**2. 试验原理**

将压头（金刚石圆锥、硬质合金球）按图3-3分两个步骤压入试样表面，经规定保持时间后，卸除主试验力$F_1$，测量在初试验力$F_0$下的残余压痕深度$h$。根据$h$值及常数$N$和$S$，用下式计算洛氏硬度：

$$洛氏硬度 = N - \frac{h}{S}$$

式中　$N$——给定标尺的硬度数，对于A、C、D、N和T标尺，$N$取100，对于B、E、F、G、H和K标尺，$N$取130；

$h$——残余压痕深度，单位为mm；

$S$——给定标尺的单位，对于A、B、C、D、E、F、G、H和K标尺，$S$取0.002，对于N和T标尺，$S$取0.001。

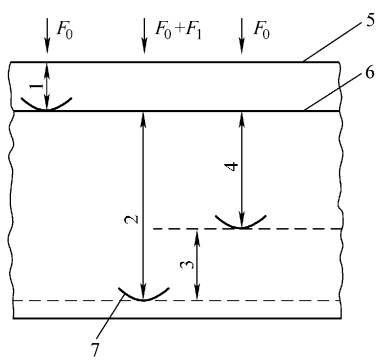



图3-3　洛氏硬度试验原理图

1—在初试验力$F_0$下的压入深度

2—由主试验力$F_1$引起的压入深度

3—卸除主试验力$F$后弹性回复深度

4—残余压入深度$h$

5—试样表面　6—测量基准面

7—压头位置

**3. 洛氏硬度标尺**

洛氏硬度标尺如表 3-2 所示。

**表 3-2　洛氏硬度标尺**

| 洛氏硬度标尺 | 硬度符号[④] | 压头类型 | 初试验力 $F_0$/N | 主试验力 $F_1$/N | 总试验力 $F$/N | 适用范围 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A[①] | HRA | 金刚石圆锥 | 98.07 | 490.3 | 588.4 | 20HRA～88HRA |
| B[②] | HRB | 直径 1.5875mm 球 | 98.07 | 882.6 | 980.7 | 20HRB～100HRB |
| C[③] | HRC | 金刚石圆锥 | 98.07 | 1373 | 1471 | 20HRC～70HRC |
| D | HRD | 金刚石圆锥 | 98.07 | 882.6 | 980.7 | 40HRD～77HRD |
| E | HRE | 直径 3.175mm 球 | 98.07 | 882.6 | 980.7 | 70HRE～100HRE |
| F | HRF | 直径 1.5875mm 球 | 98.07 | 490.3 | 588.4 | 60HRF～100HRF |
| G | HRG | 直径 1.5875mm 球 | 98.07 | 1373 | 1471 | 30HRG～94HRG |
| H | HRH | 直径 3.175mm 球 | 98.07 | 490.3 | 588.4 | 80HRH～100HRH |
| K | HRK | 直径 3.175mm 球 | 98.07 | 1373 | 1471 | 40HRK～100HRK |
| 15N | HR15N | 金刚石圆锥 | 29.42 | 117.7 | 147.1 | 70HR15N～94HR15N |
| 30N | HR30N | 金刚石圆锥 | 29.42 | 264.8 | 294.2 | 42HR30N～86HR30N |
| 45N | HR45N | 金刚石圆锥 | 29.42 | 411.9 | 441.3 | 20HR45N～77HR45N |
| 15T | HR15T | 直径 1.5875mm 球 | 29.42 | 117.7 | 147.1 | 67HR15T～93HR15T |
| 30T | HR30T | 直径 1.5875mm 球 | 29.42 | 264.8 | 294.2 | 29HR30T～82HR30T |
| 45T | HR45T | 直径 1.5875mm 球 | 29.42 | 411.9 | 441.3 | 10HR45T～72HR45T |

注：如果在产品标准或协议中有规定时，可以使用直径为 6.350mm 和 12.70mm 的球形压头。

① 试验允许范围可延伸至 94HRA。

② 如果在产品标准或协议中有规定时，试验允许范围可延伸至 10HRBW。

③如果压痕具有合适的尺寸，试验允许范围可延伸至 10HRC。

④ 使用硬质合金球压头的标尺，硬度符号后面加 W；使用钢球压头的标尺，硬度符号后面加 S。

**4. 洛氏硬度的表示方法**

1）A、C 和 D 标尺洛氏硬度用硬度值、符号 HR、使用的标尺字母表示，如 56HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 56。

2）B、E、F、G、H 和 K 标尺洛氏硬度用硬度值、符号 HR、使用的标尺和球压头代号（硬质合金球为 W，钢球压头为 S）表示，如 62HRBW 表示用硬质合金球压头在 B 标尺上测得的洛氏硬度值为 62。

3）N 标尺表面洛氏硬度用硬度值、符号 HR、试验力数值（总试验力）和使用的标尺表示，如 60HR30N 表示用总试验力为 294.2N 的 30N 标尺测得的表面洛氏硬度值为 60。

4）T 标尺表面洛氏硬度用硬度值、符号 HR、试验力数值（总试验力）、使用的标尺和压头代号表示，如 35HR30TW 表示用硬质合金球压头在总试验力为 294.2N 的 30T 标尺测得的表面洛氏硬度值为 35。

**5. 试验程序**

1）试验一般在 10～35℃室温下进行。洛氏硬度试验应选择在较小的温度变化范围内进行，温度的变化可能会对试验结果有影响，试样和硬度计的温度也可能会影响试验结果。因此，试验人员应该确保试验温度不会影响试验结果。

2）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，避免试样产

生位移。如果使用固定装置，应与GB/T 230.2的规定一致。在大量试验前或距上次试验超过24h，以及移动和更换压头或载物台之后，应确定硬度计的压头和载物台安装正确。上述调整后的前两次试验结果应舍弃。应对圆柱形试样作适当支承，例如放置在洛氏硬度值不低于60HRC的带有V形槽的试样台上。尤其应注意，保证压头、试样、V形槽与硬度计支座中心对中。

3）使压头与试样表面接触，无冲击和振动地施加初试验力 $F_0$，初试验力保持时间不应超过3s。对于电子控制的硬度计，施加初始试验力的时间（$t_a$）的1/2和初始试验力保持时间（$t_{pm}$）之和满足下式：

$$t_p = t_a/2 + t_{pm} \leqslant 3\text{s}$$

式中　$t_p$——初始试验力施加总时间，单位为s；

$t_a$——初始试验力施加时间，单位为s；

$t_{pm}$——初始试验力保持时间，单位为s。

4）无冲击和振动地将测量装置调整至基准位置，从初试验力 $F_0$ 施加至总试验力 $F$ 的时间应不小于1s且不大于8s。一般情况下，对于约为60HRC的试样从 $F_0$ 至 $F$ 的时间为2～3s。对于N和T标尺的硬度，约为78HR30N的试样建议加力时间为1～1.5s。

5）总试验力 $F$ 保持时间为4s±2s，然后卸除主试验力 $F_1$，保持初试验力 $F_0$，经短时间稳定后，进行读数。对于压头持续压入而呈现过度塑性流变（压痕蠕变）的试样，应保持施加全部试验力。当产品标准中另有规定时，施加全部试验力的时间可以超过6s。在这种情况下，实际施加试验力的时间应在试验结果中注明（例如：65HRFW，10s）。

6）洛氏硬度值用公式洛氏硬度 $= N - \dfrac{h}{S}$ 由残余压痕深度 $h$ 计算出，通常从测量装置中直接读数。

7）试验过程中，硬度计应避免受到冲击或振动。

8）两相邻压痕中心之间的距离至少应为压痕直径的4倍，并且不应小于2mm；任一压痕中心距试样边缘的距离至少应为压痕直径的2.5倍，并且应不小于1mm。

**6. 洛氏硬度的修正**

1）在凸圆柱面上试验时，用金刚石圆锥压头试验（A、C和D标尺）的洛氏硬度修正值如表3-3所示，用1.5875mm球压头试验（B、F和G标尺）的洛氏硬度修正值如表3-4所示，表面洛氏硬度试验（N标尺）洛氏硬度修正值如表3-5所示，表面洛氏硬度试验（T标尺）洛氏硬度修正值如表3-6所示。

**表3-3　用金刚石圆锥压头试验（A、C和D标尺）的洛氏硬度修正值**

| 洛氏硬度读数 | 洛氏硬度修正值 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲率半径/mm | | | | | | | | |
| | 3 | 5 | 6.5 | 8 | 9.5 | 11 | 12.5 | 16 | 19 |
| 20 | | | | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 |
| 25 | | | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 30 | | | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 |

（续）

| 洛氏硬度读数 | 洛氏硬度修正值 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲率半径/mm | | | | | | | | |
| | 3 | 5 | 6.5 | 8 | 9.5 | 11 | 12.5 | 16 | 19 |
| 35 | | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |
| 40 | | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |
| 45 | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 50 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 55 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| 60 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| 65 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| 70 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| 75 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 80 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 85 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 90 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

注：大于3HRA、3HRC和3HRD的修正值太大，不在表中规定。

**表3-4 用1.5875mm球压头试验（B、F和G标尺）的洛氏硬度修正值**

| 洛氏硬度读数 | 洛氏硬度修正值 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲率半径/mm | | | | | | |
| | 3 | 5 | 6.5 | 8 | 9.5 | 11 | 12.5 |
| 20 | | | | 4.5 | 4.0 | 3.5 | 3.0 |
| 30 | | | 5.0 | 4.5 | 3.5 | 3.0 | 2.5 |
| 40 | | | 4.5 | 4.0 | 3.0 | 2.5 | 2.5 |
| 50 | | | 4.0 | 3.5 | 3.0 | 2.5 | 2.0 |
| 60 | | 5.0 | 3.5 | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 2.0 |
| 70 | | 4.0 | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 2.0 | 1.5 |
| 80 | 5.0 | 3.5 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 90 | 4.0 | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.0 |
| 100 | 3.5 | 2.5 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 |

注：大于5HRB、5HRF和5HRG的修正值太大，不在表中规定。

**表3-5 表面洛氏硬度试验（N标尺）洛氏硬度修正值**

| 表面洛氏硬度读数 | 表面洛氏硬度修正值 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲率半径/mm | | | | | |
| | 1.6 | 3.2 | 5 | 6.5 | 9.5 | 12.5 |
| 20 | (6.0) | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 25 | (5.5) | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 |
| 30 | (5.5) | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 |
| 35 | (5.0) | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 |
| 40 | (4.5) | 2.5 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 |
| 45 | (4.0) | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 50 | (3.5) | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 55 | (3.5) | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |
| 60 | 3.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |
| 65 | 2.5 | 1.5 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

（续）

| 表面洛氏硬度读数 | 表面洛氏硬度修正值 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲率半径/mm | | | | | |
| | 1.6 | 3.2 | 5 | 6.5 | 9.5 | 12.5 |
| 70 | 3.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 75 | 1.5 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| 80 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| 85 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

注：1. 修正值仅为近似值，代表从表中给出曲面上实测平均值，精确至0.5个表面洛氏硬度单位。
2. 圆柱面的试验结果受主轴及V形试台与压头同轴度、试样表面粗糙度及圆柱面平直度综合影响。
3. 对表中其他半径的修正值，可用线性内插法求得。
4. 括号中的修正值，经协商后方可使用。

**表 3-6　表面洛氏硬度试验（T标尺）洛氏硬度修正值**

| 表面洛氏硬度读数 | 表面洛氏硬度修正值 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲率半径/mm | | | | | | |
| | 1.6 | 3.2 | 5 | 6.5 | 8 | 9.5 | 12.5 |
| 20 | (13) | (9.0) | (6.0) | (4.5) | (3.5) | 3.0 | 2.0 |
| 30 | (11.5) | (7.5) | (5.0) | (4.0) | (3.5) | 2.5 | 2.0 |
| 40 | (10.0) | (6.5) | (4.5) | (3.5) | 3.0 | 2.5 | 2.0 |
| 50 | (8.5) | (5.5) | (4.0) | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 |
| 60 | (6.5) | (4.5) | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.5 |
| 70 | (5.0) | (3.5) | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 1.0 |
| 80 | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 |
| 90 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

注：1. 修正值仅为近似值，代表从表中给出曲面上实测平均值，精确至0.5个表面洛氏硬度单位。
2. 圆柱面的试验结果受主轴及V形试台与压头同轴度、试样表面粗糙度及圆柱面平直度综合影响。
3. 对表中其他半径的修正值，可用线性内插法求得。
4. 括号中的修正值，经协商后方可使用。

2）在凸球面上试验的洛氏硬度修正

在凸球面上试验的洛氏硬度修正值按下式计算：

$$\Delta H = 59 \times \frac{\left(1 - \frac{H}{160}\right)^2}{d}$$

式中　$\Delta H$——洛氏硬度修正值；

$H$——洛氏硬度值；

$d$——球直径，单位为mm。

在凸球面上试验的洛氏硬度修正值如表3-7所示。

**表 3-7　在凸球面上试验的洛氏硬度修正值**

| 洛氏硬度读数 | 洛氏硬度修正值 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 凸球面直径 $d$/mm | | | | | | | | |
| | 4 | 6.5 | 8 | 9.5 | 11 | 12.5 | 15 | 20 | 25 |
| 55HRC | 6.4 | 3.9 | 3.2 | 2.7 | 2.3 | 2.0 | 1.7 | 1.3 | 1.0 |
| 60HRC | 5.8 | 3.6 | 2.9 | 2.4 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.2 | 0.9 |
| 65HRC | 5.2 | 3.2 | 2.6 | 2.2 | 1.9 | 1.7 | 1.4 | 1.0 | 0.8 |

**7. 薄产品 HR30Tm 和 HR15Tm 试验规范**

该试验与 GB/T 230.1 中规定的 HR30T 或 HR15T 试验条件相似，但经协议允许在试样背面出现变形痕迹（这在 HRT 试验中不允许）。

该试验可用于厚度小于 0.6mm 至产品标准中给出的最小厚度的产品。可对硬度在 80HR30T（相当于 90HR15T）以下的薄件进行试验。产品标准规定 HR30Tm 或 HR15Tm 硬度时，可按此方法试验。

除应满足常规洛氏试验要求外，还应满足以下要求：

（1）试样支座　试样支座应使用直径为 4.5mm 的金刚石平板。支座面应与压头轴线垂直，支座轴线应与主轴同轴，并能稳固精确地安装于硬度计试样台上。

（2）试样制备　如果有必要减薄试样，要对试样上下两面进行加工，加工中应避免如发热或冷变形等对金属基体性能的影响。基体金属不应薄于最小允许厚度。

（3）压痕距离　如果无其他规定，两相邻压痕中心间距离或任一压痕中心距试样边缘距离不小于 5mm。

**8. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，修约至 0.5HR。

## 3.3　金属材料布氏硬度试验

金属材料布氏硬度试验按照 GB/T 231.1—2009《金属材料　布氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》、GB/T 231.2—2012《金属材料　布氏硬度试验　第 2 部分：硬度计的检验与校准》、GB/T 231.3—2012《金属材料　布氏硬度试验　第 3 部分：标准硬度块的标定》和 GB/T 231.4—2009《金属材料　布氏硬度试验　第 4 部分：硬度值表》进行。

### 3.3.1　试样

1）试样表面应光滑平坦，无氧化皮及外来污物，尤其不应有油脂。

2）试样的制备应使受热或冷加工等因素对表面硬度的影响减至最小，尤其对于残余压痕深度浅的试样应特别注意。

3）试验后试样背面不应出现可见变形。

4）试样表面粗糙度 $Ra$ 不大于 1.6μm。

5）试验厚度至少应为压痕深度的 8 倍，试样最小厚度与压痕平均直径的关系如表 3-8 所示。试验后，试样背部如果出现可见变形，则表明试样太薄。

**表 3-8　压痕平均直径与试样最小厚度关系**　（单位：mm）

| 压痕的平均直径 | 试样的最小厚度 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $d$ | $D=1$ | $D=2.5$ | $D=5$ | $D=10$ |
| 0.2 | 0.08 | | | |
| 0.3 | 0.18 | | | |
| 0.4 | 0.33 | | | |
| 0.5 | 0.54 | | | |
| 0.6 | 0.80 | 0.29 | | |
| 0.7 | | 0.40 | | |

（续）

| 压痕的平均直径 | 试样的最小厚度 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $d$ | $D=1$ | $D=2.5$ | $D=5$ | $D=10$ |
| 0.8 | | 0.53 | | |
| 0.9 | | 0.67 | | |
| 1.0 | | 0.83 | | |
| 1.1 | | 1.02 | | |
| 1.2 | | 1.23 | 0.58 | |
| 1.3 | | 1.46 | 0.69 | |
| 1.4 | | 1.72 | 0.80 | |
| 1.5 | | 2.00 | 0.92 | |
| 1.6 | | | 1.05 | |
| 1.7 | | | 1.19 | |
| 1.8 | | | 1.34 | |
| 1.9 | | | 1.50 | |
| 2.0 | | | 1.67 | |
| 2.2 | | | 2.04 | |
| 2.4 | | | 2.46 | 1.17 |
| 2.6 | | | 2.92 | 1.38 |
| 2.8 | | | 3.43 | 1.50 |
| 3.0 | | | 4.00 | 1.84 |
| 3.2 | | | | 2.10 |
| 3.4 | | | | 2.38 |
| 3.6 | | | | 2.68 |
| 3.8 | | | | 3.00 |
| 4.0 | | | | 3.34 |
| 4.2 | | | | 3.70 |
| 4.4 | | | | 4.08 |
| 4.6 | | | | 4.48 |
| 4.8 | | | | 4.91 |
| 5.0 | | | | 5.36 |
| 5.2 | | | | 5.83 |
| 5.4 | | | | 6.33 |
| 5.6 | | | | 6.86 |
| 5.8 | | | | 7.42 |
| 6.0 | | | | 8.00 |

### 3.3.2　试验设备

布氏硬度试验的优点是硬度代表性好。由于通常采用的是 10mm 直径球压头，294.2kN（3000kgf）试验力，其压痕面积较大，能反映较大范围内金属各组成相综合影响的平均值，而不受个别组成相及微小不均匀度的影响，因此特别适用于测定灰铸铁、轴承合金和具有粗大晶粒的金属材料。它的试验数据稳定，重现性好，精度高于洛氏硬度，低于维氏硬度。此外，布氏硬度值与抗拉强度值之间存在较好的对应关系。

布氏硬度试验的特点是压痕较大，成品检验有困难，试验过程比洛氏硬度试验复

杂，测量操作和压痕测量都比较费时。由于压痕边缘的凸起、凹陷或圆滑过渡都会使压痕直径的测量产生较大误差，因此要求操作者具有熟练的试验技术和丰富的工作经验，一般要求由专门的试验员操作。布氏硬度计如图 3-4 所示。

使用者在使用硬度计之前，对其使用的硬度标尺或范围进行检查。

日常检查之前，对于每个范围/标尺和硬度水平，应使用依照 GB/T 231.3 标定过的标准硬度块上的标准压痕进行压痕测量装置的间接检验。压痕测量值应与标准硬度块证书上的标准值相差在 0.5% 以内。如果测量装置不能满足上述要求，应采取相应措施。

日常检查应在按照 GB/T 231.3 标定的标准硬度块上至少打一个压痕。如果测量的硬度（平均）值与标准硬度块标准值的差值在 GB/T 231.2 中给出的允许误差之内，则硬度计被认为是满意的；如果超出允许误差，应立即进行间接检验。



图 3-4　布氏硬度计

所测数据应当保存一段时间，以便监测硬度计的再现性和测量设备的稳定性。

## 3.3.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在 10～35℃的温度下进行。对于温度要求严格的试验，应控制在 23℃ ± 5℃之内。

2）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，以避免试样产生位移。

3）试验过程中，硬度计应避免受到冲击和振动。

4）每个试样上的试验点数不少于 4 点，第 1 点不计。

5）在大量试验前或距前一试验超过 24h，以及压头或支承台移动或重新安装后，均应进行检定，上述调整后的第一次试验结果不作为正式数据。

6）一般使用表 3-9 中所示的各级试验力。如果有特殊协议，其他试验力-球直径平方的比率也可以用。

**表 3-9　不同条件下的试验力**

| 硬度符号 | 硬质合金球直径 $D$/mm | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | 试验力的标称值 $F$ |
|---|---|---|---|
| HBW 10/3000 | 10 | 30 | 29.42kN |
| HBW 10/1500 | 10 | 15 | 14.71kN |
| HBW 10/1000 | 10 | 10 | 9.807kN |
| HBW 10/500 | 10 | 5 | 4.903kN |
| HBW 10/250 | 10 | 2.5 | 2.452kN |
| HBW 10/100 | 10 | 1 | 980.7N |
| HBW 5/750 | 5 | 30 | 7.355kN |
| HBW 5/250 | 5 | 10 | 2.452kN |
| HBW 5/125 | 5 | 5 | 1.226kN |

（续）

| 硬度符号 | 硬质合金球直径 $D$/mm | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | 试验力的标称值 $F$ |
|---|---|---|---|
| HBW 5/62.5 | 5 | 2.5 | 612.9N |
| HBW 5/25 | 5 | 1 | 245.2N |
| HBW 2.5/187.5 | 2.5 | 30 | 1.839kN |
| HBW 2.5/62.5 | 2.5 | 10 | 612.9N |
| HBW 2.5/31.25 | 2.5 | 5 | 306.5N |
| HBW 2.5/15.625 | 2.5 | 2.5 | 153.2N |
| HBW 2.5/6.25 | 2.5 | 1 | 61.29N |
| HBW 1/30 | 1 | 30 | 294.2N |
| HBW 1/10 | 1 | 10 | 98.07N |
| HBW 1/5 | 1 | 5 | 49.03N |
| HBW 1/2.5 | 1 | 2.5 | 24.52N |
| HBW 1/1 | 1 | 1 | 9.807N |

7）试验力的选择应保证压痕直径在 $0.24D \sim 0.26D$ 之间。试验力-压头球直径平方的比率（$0.102F/D^2$ 比值）应根据材料和硬度值选择，如表 3-10 所示。

为了保证在尽可能大的有代表性的试样区域试验，应尽可能地选取大直径压头。

**表 3-10　不同材料的试验力-压头球直径平方的比率**

| 材　　料 | 布氏硬度 HBW | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$ /MPa | 材　　料 | 布氏硬度 HBW | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$ /MPa |
|---|---|---|---|---|---|
| 钢、镍合金、钛合金 | | 30 | 轻金属及合金 | <35 | 2.5 |
| 铸铁 | <140 | 10 | | 35 ~ 80 | 5 |
| | ≥140 | 30 | | | 10 |
| 铜及铜合金 | <35 | 5 | | | 15 |
| | 35 ~ 200 | 10 | | >80 | 10 |
| | >200 | 30 | | | 15 |
| | | | 铅、锡 | 1 | |

注：对于铸铁的试验，压头球直径一般为 2.5mm、5mm 和 10mm。

**2. 试验原理**

对一定直径 $D$ 的硬质合金球施加试验力 $F$，使之压入试样表面，经规定保持时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕的直径，如图 3-5 所示。布氏硬度值是试验力除以压痕表面积所得的商。

布氏硬度的计算如下：

$$
\text{布氏硬度} = 0.102 \times \frac{F}{A} = 0.102 \times \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}
$$

$$
= \frac{0.204F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}
$$

即布氏硬度的计算公式为

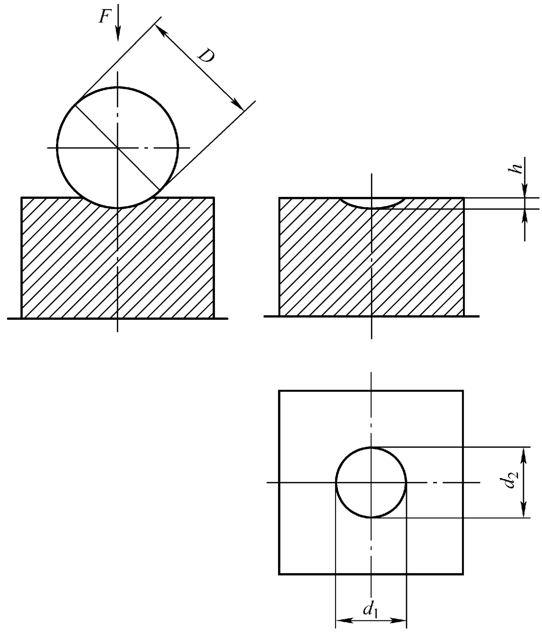



图 3-5　布氏硬度试验原理

$$布氏硬度 = \frac{0.204F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中　0.102——试验力单位由 kgf 更换为 N 后需要乘以的系数，即 $1/g = 1/9.80665 = 0.02$（$g$ 为标准重力加速度）；

$F$——试验力，单位为 N；

$A$——压痕表面积，单位为 $mm^2$；

$D$——球直径，单位为 mm；

$h$——压痕深度，单位为 mm；

$d$——压痕平均直径，单位为 mm；$d = (d_1 + d_2)/2$，$d_1$、$d_2$ 为在两个相互垂直方向上测量的压痕直径（见图 3-5）。

**3. 布氏硬度的表示方法**

布氏硬度用符号 HBW 表示，符号 HBW 前面为硬度值，符号后面的数字依次表示球直径（单位为 mm）、试验力数字及与规定时间（10～15s）不同的试验力保持时间。例如：350HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球在 7.355kN（750kgf）试验力下保持 10～15s 测定的布氏硬度值为 350；600HBW1/30/20 表示用直径 1mm 的硬质合金球在 294.2 N（30kgf）试验力下保持 20s 测定的布氏硬度值为 600。

**4. 试验程序**

1）试验一般在 10～35℃ 室温下进行。对于要求高的产品，温度为 23℃ ±5℃。

2）当试样尺寸允许时，应优先选用直径 10mm 的球压头进行试验。

3）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，避免试样产

生位移。

4）使压头与试样表面接触，无冲击和振动地垂直于试验面施加试验力，直至达到规定试验力值。从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应在 2～8s 之间。试验力保持时间为 10～15s。对于要求试验力保持时间较长的材料，试验力保持时间允许误差应在 ±2s 以内。

5）在整个试验期间，硬度计不应受到影响试验结果的冲击和振动。

6）任一压痕中心距试样边缘距离至少应为压痕平均直径的 2.5 倍，两相邻压痕中心间距离至少应为压痕平均直径的 3 倍。

7）应在两相互垂直方向测量压痕直径。用两个读数的平均值计算布氏硬度，或按表 3-11 查得布氏硬度值。对于自动测量装置，可采用如下方式计算：①等间隔多次测量的平均值；②材料表面压痕投影面积数值。

**表 3-11　平面布氏硬度值计算表**

| 硬质合金球直径 $D$/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 $d$/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 2.40 | 1.200 | 0.6000 | 0.240 | 653 | 327 | 218 | 109 | 54.5 | 21.8 |
| 2.41 | 1.205 | 0.6025 | 0.241 | 648 | 324 | 216 | 108 | 54.0 | 21.6 |
| 2.42 | 1.210 | 0.6050 | 0.242 | 643 | 321 | 214 | 107 | 53.5 | 21.4 |
| 2.43 | 1.215 | 0.6075 | 0.243 | 637 | 319 | 212 | 106 | 53.1 | 21.2 |
| 2.44 | 1.220 | 0.6100 | 0.244 | 632 | 316 | 211 | 105 | 52.7 | 21.1 |
| 2.45 | 1.225 | 0.6125 | 0.245 | 627 | 313 | 209 | 104 | 52.2 | 20.9 |
| 2.46 | 1.230 | 0.6150 | 0.246 | 621 | 311 | 207 | 104 | 51.8 | 20.7 |
| 2.47 | 1.235 | 0.6175 | 0.247 | 616 | 308 | 205 | 103 | 51.4 | 20.5 |
| 2.48 | 1.240 | 0.6200 | 0.248 | 611 | 306 | 204 | 102 | 50.9 | 20.4 |
| 2.49 | 1.245 | 0.6225 | 0.249 | 606 | 303 | 202 | 101 | 50.5 | 20.2 |
| 2.50 | 1.250 | 0.6250 | 0.250 | 601 | 301 | 200 | 100 | 50.1 | 20.0 |
| 2.51 | 1.255 | 0.6275 | 0.251 | 597 | 298 | 199 | 99.4 | 49.7 | 19.9 |
| 2.52 | 1.260 | 0.6300 | 0.252 | 592 | 296 | 197 | 98.6 | 49.3 | 19.7 |
| 2.53 | 1.265 | 0.6325 | 0.253 | 587 | 294 | 196 | 97.8 | 48.9 | 19.6 |
| 2.54 | 1.270 | 0.6350 | 0.254 | 582 | 291 | 194 | 97.1 | 48.5 | 19.4 |
| 2.55 | 1.275 | 0.6375 | 0.255 | 578 | 289 | 193 | 96.3 | 48.1 | 19.3 |
| 2.56 | 1.280 | 0.6400 | 0.256 | 573 | 287 | 191 | 95.5 | 47.8 | 19.1 |
| 2.57 | 1.285 | 0.6425 | 0.257 | 569 | 284 | 190 | 94.8 | 47.4 | 19.0 |
| 2.58 | 1.290 | 0.6450 | 0.258 | 564 | 282 | 188 | 94.0 | 47.0 | 18.8 |
| 2.59 | 1.295 | 0.6475 | 0.259 | 560 | 280 | 187 | 93.3 | 46.6 | 18.7 |
| 2.60 | 1.300 | 0.6500 | 0.260 | 555 | 278 | 185 | 92.6 | 46.3 | 18.5 |
| 2.61 | 1.305 | 0.6525 | 0.261 | 551 | 276 | 184 | 91.8 | 45.9 | 18.4 |
| 2.62 | 1.310 | 0.6550 | 0.262 | 547 | 273 | 182 | 91.1 | 45.6 | 18.2 |
| 2.63 | 1.315 | 0.6575 | 0.263 | 543 | 271 | 181 | 90.4 | 45.2 | 18.1 |

（续）

| 硬质合金球直径 D/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 F | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 d/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 2.64 | 1.320 | 0.6600 | 0.264 | 538 | 269 | 179 | 89.7 | 44.9 | 17.9 |
| 2.65 | 1.325 | 0.6625 | 0.265 | 534 | 267 | 178 | 89.0 | 44.5 | 17.8 |
| 2.66 | 1.330 | 0.6650 | 0.266 | 530 | 265 | 177 | 88.4 | 44.2 | 17.7 |
| 2.67 | 1.335 | 0.6675 | 0.267 | 526 | 263 | 175 | 87.7 | 43.8 | 17.5 |
| 2.68 | 1.340 | 0.6700 | 0.268 | 522 | 261 | 174 | 87.0 | 43.5 | 17.4 |
| 2.69 | 1.345 | 0.6725 | 0.269 | 518 | 259 | 173 | 86.4 | 43.2 | 17.3 |
| 2.70 | 1.350 | 0.6750 | 0.270 | 514 | 257 | 171 | 85.7 | 42.9 | 17.1 |
| 2.71 | 1.355 | 0.6775 | 0.271 | 510 | 255 | 170 | 85.1 | 42.5 | 17.0 |
| 2.72 | 1.360 | 0.6800 | 0.272 | 507 | 253 | 169 | 84.4 | 42.2 | 16.9 |
| 2.73 | 1.365 | 0.6825 | 0.273 | 503 | 251 | 168 | 83.8 | 41.9 | 16.8 |
| 2.74 | 1.370 | 0.6850 | 0.274 | 499 | 250 | 166 | 83.2 | 41.6 | 16.6 |
| 2.75 | 1.375 | 0.6875 | 0.275 | 495 | 248 | 165 | 82.6 | 41.3 | 16.5 |
| 2.76 | 1.380 | 0.6900 | 0.276 | 492 | 246 | 164 | 81.9 | 41.0 | 16.4 |
| 2.77 | 1.385 | 0.6925 | 0.277 | 488 | 244 | 163 | 81.3 | 40.7 | 16.3 |
| 2.78 | 1.390 | 0.6950 | 0.278 | 485 | 242 | 162 | 80.8 | 40.4 | 16.2 |
| 2.79 | 1.395 | 0.6975 | 0.279 | 481 | 240 | 160 | 80.2 | 40.1 | 16.0 |
| 2.80 | 1.400 | 0.7000 | 0.280 | 477 | 239 | 159 | 79.6 | 39.8 | 15.9 |
| 2.81 | 1.405 | 0.7025 | 0.281 | 474 | 237 | 158 | 79.0 | 39.5 | 15.8 |
| 2.82 | 1.410 | 0.7050 | 0.282 | 471 | 235 | 157 | 78.4 | 39.2 | 15.7 |
| 2.83 | 1.415 | 0.7075 | 0.283 | 467 | 234 | 156 | 77.9 | 38.9 | 15.6 |
| 2.84 | 1.420 | 0.7100 | 0.284 | 464 | 232 | 155 | 77.3 | 38.7 | 15.5 |
| 2.85 | 1.425 | 0.7125 | 0.285 | 461 | 230 | 154 | 76.8 | 38.4 | 15.4 |
| 2.86 | 1.430 | 0.7150 | 0.286 | 457 | 229 | 152 | 76.2 | 38.1 | 15.2 |
| 2.87 | 1.435 | 0.7175 | 0.287 | 454 | 227 | 151 | 75.7 | 37.8 | 15.1 |
| 2.88 | 1.440 | 0.7200 | 0.288 | 451 | 225 | 150 | 75.1 | 37.6 | 15.0 |
| 2.89 | 1.445 | 0.7225 | 0.289 | 448 | 224 | 149 | 74.6 | 37.3 | 14.9 |
| 2.90 | 1.450 | 0.7250 | 0.290 | 444 | 222 | 148 | 74.1 | 37.0 | 14.8 |
| 2.91 | 1.455 | 0.7275 | 0.291 | 441 | 221 | 147 | 73.6 | 36.8 | 14.7 |
| 2.92 | 1.460 | 0.7300 | 0.292 | 438 | 219 | 146 | 73.0 | 36.5 | 14.6 |
| 2.93 | 1.465 | 0.7325 | 0.293 | 435 | 218 | 145 | 72.5 | 36.3 | 14.5 |
| 2.94 | 1.470 | 0.7350 | 0.294 | 432 | 216 | 144 | 72.0 | 36.0 | 14.4 |
| 2.95 | 1.475 | 0.7375 | 0.295 | 429 | 215 | 143 | 71.5 | 35.8 | 14.3 |
| 2.96 | 1.480 | 0.7400 | 0.296 | 426 | 213 | 142 | 71.0 | 35.5 | 14.2 |
| 2.97 | 1.485 | 0.7425 | 0.297 | 423 | 212 | 141 | 70.5 | 35.3 | 14.1 |
| 2.98 | 1.490 | 0.7450 | 0.298 | 420 | 210 | 140 | 70.1 | 35.0 | 14.0 |
| 2.99 | 1.495 | 0.7475 | 0.299 | 417 | 209 | 139 | 69.6 | 34.8 | 13.9 |
| 3.00 | 1.500 | 0.7500 | 0.300 | 415 | 207 | 138 | 69.1 | 34.6 | 13.8 |
| 3.01 | 1.505 | 0.7525 | 0.301 | 412 | 206 | 137 | 68.6 | 34.3 | 13.7 |

（续）

| 硬质合金球直径 D/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 d/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 3.02 | 1.510 | 0.7550 | 0.302 | 409 | 205 | 136 | 68.2 | 34.1 | 13.6 |
| 3.03 | 1.515 | 0.7575 | 0.303 | 406 | 203 | 135 | 67.7 | 33.9 | 13.5 |
| 3.04 | 1.520 | 0.7600 | 0.304 | 404 | 202 | 135 | 67.3 | 33.6 | 13.5 |
| 3.05 | 1.525 | 0.7625 | 0.305 | 401 | 200 | 134 | 66.8 | 33.4 | 13.4 |
| 3.06 | 1.530 | 0.7650 | 0.306 | 398 | 199 | 133 | 66.4 | 33.2 | 13.3 |
| 3.07 | 1.535 | 0.7675 | 0.307 | 395 | 198 | 132 | 65.9 | 33.0 | 13.2 |
| 3.08 | 1.540 | 0.7700 | 0.308 | 393 | 196 | 131 | 65.5 | 32.7 | 13.1 |
| 3.09 | 1.545 | 0.7725 | 0.309 | 390 | 195 | 130 | 65.0 | 32.5 | 13.0 |
| 3.10 | 1.550 | 0.7750 | 0.310 | 388 | 194 | 129 | 64.6 | 32.3 | 12.9 |
| 3.11 | 1.555 | 0.7775 | 0.311 | 385 | 193 | 128 | 64.2 | 32.1 | 12.8 |
| 3.12 | 1.560 | 0.7800 | 0.312 | 383 | 191 | 128 | 63.8 | 31.9 | 12.8 |
| 3.13 | 1.565 | 0.7825 | 0.313 | 380 | 190 | 127 | 63.3 | 31.7 | 12.7 |
| 3.14 | 1.570 | 0.7850 | 0.314 | 378 | 189 | 126 | 62.9 | 31.5 | 12.6 |
| 3.15 | 1.575 | 0.7875 | 0.315 | 375 | 188 | 125 | 62.5 | 31.3 | 12.5 |
| 3.16 | 1.580 | 0.7900 | 0.316 | 373 | 186 | 124 | 62.1 | 31.1 | 12.4 |
| 3.17 | 1.585 | 0.7925 | 0.317 | 370 | 185 | 123 | 61.7 | 30.9 | 12.3 |
| 3.18 | 1.590 | 0.7950 | 0.318 | 368 | 184 | 123 | 61.3 | 30.7 | 12.3 |
| 3.19 | 1.595 | 0.7975 | 0.319 | 366 | 183 | 122 | 60.9 | 30.5 | 12.2 |
| 3.20 | 1.600 | 0.8000 | 0.320 | 363 | 182 | 121 | 60.5 | 30.3 | 12.1 |
| 3.21 | 1.605 | 0.8025 | 0.321 | 361 | 180 | 120 | 60.1 | 30.1 | 12.0 |
| 3.22 | 1.610 | 0.8050 | 0.322 | 359 | 179 | 120 | 59.8 | 29.9 | 12.0 |
| 3.23 | 1.615 | 0.8075 | 0.323 | 356 | 178 | 119 | 59.4 | 29.7 | 11.9 |
| 3.24 | 1.620 | 0.8100 | 0.324 | 354 | 177 | 118 | 59.0 | 29.5 | 11.8 |
| 3.25 | 1.625 | 0.8125 | 0.325 | 352 | 176 | 117 | 58.6 | 29.3 | 11.7 |
| 3.26 | 1.630 | 0.8150 | 0.326 | 350 | 175 | 117 | 58.3 | 29.1 | 11.7 |
| 3.27 | 1.635 | 0.8175 | 0.327 | 347 | 174 | 116 | 57.9 | 29.0 | 11.6 |
| 3.28 | 1.640 | 0.8200 | 0.328 | 345 | 173 | 115 | 57.5 | 28.8 | 11.5 |
| 3.29 | 1.645 | 0.8225 | 0.329 | 343 | 172 | 114 | 57.2 | 28.6 | 11.4 |
| 3.30 | 1.650 | 0.8250 | 0.330 | 341 | 170 | 114 | 56.8 | 28.4 | 11.4 |
| 3.31 | 1.655 | 0.8275 | 0.331 | 339 | 169 | 113 | 56.5 | 28.2 | 11.3 |
| 3.32 | 1.660 | 0.8300 | 0.332 | 337 | 168 | 112 | 56.1 | 28.1 | 11.2 |
| 3.33 | 1.665 | 0.8325 | 0.333 | 335 | 167 | 112 | 55.8 | 27.9 | 11.2 |
| 3.34 | 1.670 | 0.8350 | 0.334 | 333 | 166 | 111 | 55.4 | 27.7 | 11.1 |
| 3.35 | 1.675 | 0.8375 | 0.335 | 331 | 165 | 110 | 55.1 | 27.5 | 11.0 |
| 3.36 | 1.680 | 0.8400 | 0.336 | 329 | 164 | 110 | 54.8 | 27.4 | 11.0 |
| 3.37 | 1.685 | 0.8425 | 0.337 | 326 | 163 | 109 | 54.4 | 27.2 | 10.9 |
| 3.38 | 1.690 | 0.8450 | 0.338 | 325 | 162 | 108 | 54.1 | 27.0 | 10.8 |
| 3.39 | 1.695 | 0.8475 | 0.339 | 323 | 161 | 108 | 53.8 | 26.9 | 10.8 |

（续）

| 硬质合金球直径 D/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 d/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 3.40 | 1.700 | 0.8500 | 0.340 | 321 | 160 | 107 | 53.4 | 26.7 | 10.7 |
| 3.41 | 1.705 | 0.8525 | 0.341 | 319 | 159 | 106 | 53.1 | 26.6 | 10.6 |
| 3.42 | 1.710 | 0.8550 | 0.342 | 317 | 158 | 106 | 52.8 | 26.4 | 10.6 |
| 3.43 | 1.715 | 0.8575 | 0.343 | 315 | 157 | 105 | 52.5 | 26.2 | 10.5 |
| 3.44 | 1.720 | 0.8600 | 0.344 | 313 | 156 | 104 | 52.2 | 26.1 | 10.4 |
| 3.45 | 1.725 | 0.8625 | 0.345 | 311 | 156 | 104 | 51.8 | 25.9 | 10.4 |
| 3.46 | 1.730 | 0.8650 | 0.346 | 309 | 155 | 103 | 51.5 | 25.8 | 10.3 |
| 3.47 | 1.735 | 0.8675 | 0.347 | 307 | 154 | 102 | 51.2 | 25.6 | 10.2 |
| 3.48 | 1.740 | 0.8700 | 0.348 | 306 | 153 | 102 | 50.9 | 25.5 | 10.2 |
| 3.49 | 1.745 | 0.8725 | 0.349 | 304 | 152 | 101 | 50.6 | 25.3 | 10.1 |
| 3.50 | 1.750 | 0.8750 | 0.350 | 302 | 151 | 101 | 50.3 | 25.2 | 10.1 |
| 3.51 | 1.755 | 0.8775 | 0.351 | 300 | 150 | 100 | 50.0 | 25.0 | 10.0 |
| 3.52 | 1.760 | 0.8800 | 0.352 | 298 | 149 | 99.5 | 49.7 | 24.9 | 9.95 |
| 3.53 | 1.765 | 0.8825 | 0.353 | 297 | 148 | 98.9 | 49.4 | 24.7 | 9.89 |
| 3.54 | 1.770 | 0.8850 | 0.354 | 295 | 147 | 98.3 | 49.2 | 24.6 | 9.83 |
| 3.55 | 1.775 | 0.8875 | 0.355 | 293 | 147 | 97.7 | 48.9 | 24.4 | 9.77 |
| 3.56 | 1.780 | 0.8900 | 0.356 | 292 | 146 | 97.2 | 48.6 | 24.3 | 9.72 |
| 3.57 | 1.785 | 0.8925 | 0.357 | 290 | 145 | 96.6 | 48.3 | 24.2 | 9.66 |
| 3.58 | 1.790 | 0.8950 | 0.358 | 288 | 144 | 96.1 | 48.0 | 24.0 | 9.61 |
| 3.59 | 1.795 | 0.8975 | 0.359 | 286 | 143 | 95.5 | 47.7 | 23.9 | 9.55 |
| 3.60 | 1.800 | 0.9000 | 0.360 | 285 | 142 | 95.0 | 47.5 | 23.7 | 9.50 |
| 3.61 | 1.805 | 0.9025 | 0.361 | 283 | 142 | 94.4 | 47.2 | 23.6 | 9.44 |
| 3.62 | 1.810 | 0.9050 | 0.362 | 282 | 141 | 93.9 | 46.9 | 23.5 | 9.39 |
| 3.63 | 1.815 | 0.9075 | 0.363 | 280 | 140 | 93.3 | 46.7 | 23.3 | 9.33 |
| 3.64 | 1.820 | 0.9100 | 0.364 | 278 | 139 | 92.8 | 46.4 | 23.2 | 9.28 |
| 3.65 | 1.825 | 0.9125 | 0.365 | 277 | 138 | 92.3 | 46.1 | 23.1 | 9.23 |
| 3.66 | 1.830 | 0.9150 | 0.366 | 275 | 138 | 91.8 | 45.9 | 22.9 | 9.18 |
| 3.67 | 1.835 | 0.9175 | 0.367 | 274 | 137 | 91.2 | 45.6 | 22.8 | 9.12 |
| 3.68 | 1.840 | 0.9200 | 0.368 | 272 | 136 | 90.7 | 45.4 | 22.7 | 9.07 |
| 3.69 | 1.845 | 0.9225 | 0.369 | 271 | 135 | 90.2 | 45.1 | 22.6 | 9.02 |
| 3.70 | 1.850 | 0.9250 | 0.370 | 269 | 135 | 89.7 | 44.9 | 22.4 | 8.97 |
| 3.71 | 1.855 | 0.9275 | 0.371 | 268 | 134 | 89.2 | 44.6 | 22.3 | 8.92 |
| 3.72 | 1.860 | 0.9300 | 0.372 | 266 | 133 | 88.7 | 44.4 | 22.2 | 8.87 |
| 3.73 | 1.865 | 0.9325 | 0.373 | 265 | 132 | 88.2 | 44.1 | 22.1 | 8.82 |
| 3.74 | 1.870 | 0.9350 | 0.374 | 263 | 132 | 87.7 | 43.9 | 21.9 | 8.77 |
| 3.75 | 1.875 | 0.9375 | 0.375 | 262 | 131 | 87.2 | 43.6 | 21.8 | 8.72 |
| 3.76 | 1.880 | 0.9400 | 0.376 | 260 | 130 | 86.8 | 43.4 | 21.7 | 8.68 |
| 3.77 | 1.885 | 0.9425 | 0.377 | 259 | 129 | 86.3 | 43.1 | 21.6 | 8.63 |

（续）

| 硬质合金球直径 D/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 F | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 d/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 3.78 | 1.890 | 0.9450 | 0.378 | 257 | 129 | 85.8 | 42.9 | 21.5 | 8.58 |
| 3.79 | 1.895 | 0.9475 | 0.379 | 256 | 128 | 85.3 | 42.7 | 21.3 | 8.53 |
| 3.80 | 1.900 | 0.9500 | 0.380 | 255 | 127 | 84.9 | 42.4 | 21.2 | 8.49 |
| 3.81 | 1.905 | 0.9525 | 0.381 | 253 | 127 | 84.4 | 42.2 | 21.1 | 8.44 |
| 3.82 | 1.910 | 0.9550 | 0.382 | 252 | 126 | 83.9 | 42.0 | 21.0 | 8.39 |
| 3.83 | 1.915 | 0.9575 | 0.383 | 250 | 125 | 83.5 | 41.7 | 20.9 | 8.35 |
| 3.84 | 1.920 | 0.9600 | 0.384 | 249 | 125 | 83.0 | 41.5 | 20.8 | 8.30 |
| 3.85 | 1.925 | 0.9625 | 0.385 | 248 | 124 | 82.6 | 41.3 | 20.6 | 8.26 |
| 3.86 | 1.930 | 0.9650 | 0.386 | 246 | 123 | 82.1 | 41.1 | 20.5 | 8.21 |
| 3.87 | 1.935 | 0.9675 | 0.387 | 245 | 123 | 81.7 | 40.9 | 20.4 | 8.17 |
| 3.88 | 1.940 | 0.9700 | 0.388 | 244 | 122 | 81.3 | 40.6 | 20.3 | 8.13 |
| 3.89 | 1.945 | 0.9725 | 0.389 | 242 | 121 | 80.8 | 40.4 | 20.2 | 8.08 |
| 3.90 | 1.950 | 0.9750 | 0.390 | 241 | 121 | 80.4 | 40.2 | 20.1 | 8.04 |
| 3.91 | 1.955 | 0.9775 | 0.391 | 240 | 120 | 80.0 | 40.0 | 20.0 | 8.00 |
| 3.92 | 1.960 | 0.9800 | 0.392 | 239 | 119 | 79.5 | 39.8 | 19.9 | 7.95 |
| 3.93 | 1.965 | 0.9825 | 0.393 | 237 | 119 | 79.1 | 39.6 | 19.8 | 7.91 |
| 3.94 | 1.970 | 0.9850 | 0.394 | 236 | 118 | 78.7 | 39.4 | 19.7 | 7.87 |
| 3.95 | 1.975 | 0.9875 | 0.395 | 235 | 117 | 78.3 | 39.1 | 19.6 | 7.83 |
| 3.96 | 1.980 | 0.9900 | 0.396 | 234 | 117 | 77.9 | 38.9 | 19.5 | 7.79 |
| 3.97 | 1.985 | 0.9925 | 0.397 | 232 | 116 | 77.5 | 38.7 | 19.4 | 7.75 |
| 3.98 | 1.990 | 0.9950 | 0.398 | 231 | 116 | 77.1 | 38.5 | 19.3 | 7.71 |
| 3.99 | 1.995 | 0.9975 | 0.399 | 230 | 115 | 76.7 | 38.3 | 19.2 | 7.67 |
| 4.00 | 2.000 | 1.0000 | 0.400 | 229 | 114 | 76.3 | 38.1 | 19.1 | 7.63 |
| 4.01 | 2.005 | 1.0025 | 0.401 | 228 | 114 | 75.9 | 37.9 | 19.0 | 7.59 |
| 4.02 | 2.010 | 1.0050 | 0.402 | 226 | 113 | 75.5 | 37.7 | 18.9 | 7.55 |
| 4.03 | 2.015 | 1.0075 | 0.403 | 225 | 113 | 75.1 | 37.5 | 18.8 | 7.51 |
| 4.04 | 2.020 | 1.0100 | 0.404 | 224 | 112 | 74.7 | 37.3 | 18.7 | 7.47 |
| 4.05 | 2.025 | 1.0125 | 0.405 | 223 | 111 | 74.3 | 37.1 | 18.6 | 7.43 |
| 4.06 | 2.030 | 1.0150 | 0.406 | 222 | 111 | 73.9 | 37.0 | 18.5 | 7.39 |
| 4.07 | 2.035 | 1.0175 | 0.407 | 221 | 110 | 73.5 | 36.8 | 18.4 | 7.35 |
| 4.08 | 2.040 | 1.0200 | 0.408 | 219 | 110 | 73.2 | 36.6 | 18.3 | 7.32 |
| 4.09 | 2.045 | 1.0225 | 0.409 | 218 | 109 | 72.8 | 36.4 | 18.2 | 7.28 |
| 4.10 | 2.050 | 1.0250 | 0.410 | 217 | 109 | 72.4 | 36.2 | 18.1 | 7.24 |
| 4.11 | 2.055 | 1.0275 | 0.411 | 216 | 108 | 72.0 | 36.0 | 18.0 | 7.20 |
| 4.12 | 2.060 | 1.0300 | 0.412 | 215 | 108 | 71.7 | 35.8 | 17.9 | 7.17 |
| 4.13 | 2.065 | 1.0325 | 0.413 | 214 | 107 | 71.3 | 35.7 | 17.8 | 7.13 |
| 4.14 | 2.070 | 1.0350 | 0.414 | 213 | 106 | 71.0 | 35.5 | 17.7 | 7.10 |
| 4.15 | 2.075 | 1.0375 | 0.415 | 212 | 106 | 70.6 | 35.3 | 17.6 | 7.06 |

（续）

| 硬质合金球直径 $D$/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 $d$/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 4.16 | 2.080 | 1.0400 | 0.416 | 211 | 105 | 70.2 | 35.1 | 17.6 | 7.02 |
| 4.17 | 2.085 | 1.0425 | 0.417 | 210 | 105 | 69.9 | 34.9 | 17.5 | 6.99 |
| 4.18 | 2.090 | 1.0450 | 0.418 | 209 | 104 | 69.5 | 34.8 | 17.4 | 6.95 |
| 4.19 | 2.095 | 1.0475 | 0.419 | 208 | 104 | 69.2 | 34.6 | 17.3 | 6.92 |
| 4.20 | 2.100 | 1.0500 | 0.420 | 207 | 103 | 68.8 | 34.4 | 17.2 | 6.88 |
| 4.21 | 2.105 | 1.0525 | 0.421 | 205 | 103 | 68.5 | 34.2 | 17.1 | 6.85 |
| 4.22 | 2.110 | 1.0550 | 0.422 | 204 | 102 | 68.2 | 34.1 | 17.0 | 6.82 |
| 4.23 | 2.115 | 1.0575 | 0.423 | 203 | 102 | 67.8 | 33.9 | 17.0 | 6.78 |
| 4.24 | 2.120 | 1.0600 | 0.424 | 202 | 101 | 67.5 | 33.7 | 16.9 | 6.75 |
| 4.25 | 2.125 | 1.0625 | 0.425 | 201 | 101 | 67.1 | 33.6 | 16.8 | 6.71 |
| 4.26 | 2.130 | 1.0650 | 0.426 | 200 | 100 | 66.8 | 33.4 | 16.7 | 6.68 |
| 4.27 | 2.135 | 1.0675 | 0.427 | 199 | 99.7 | 66.5 | 33.2 | 16.6 | 6.65 |
| 4.28 | 2.140 | 1.0700 | 0.428 | 198 | 99.2 | 66.2 | 33.1 | 16.5 | 6.62 |
| 4.29 | 2.145 | 1.0725 | 0.429 | 198 | 98.8 | 65.8 | 32.9 | 16.5 | 6.58 |
| 4.30 | 2.150 | 1.0750 | 0.430 | 197 | 98.3 | 65.5 | 32.8 | 16.4 | 6.55 |
| 4.31 | 2.155 | 1.0775 | 0.431 | 196 | 97.8 | 65.2 | 32.6 | 16.3 | 6.52 |
| 4.32 | 2.160 | 1.0800 | 0.432 | 195 | 97.3 | 64.9 | 32.4 | 16.2 | 6.49 |
| 4.33 | 2.165 | 1.0825 | 0.433 | 194 | 96.8 | 64.6 | 32.3 | 16.1 | 6.46 |
| 4.34 | 2.170 | 1.0850 | 0.434 | 193 | 96.4 | 64.2 | 32.1 | 16.1 | 6.42 |
| 4.35 | 2.175 | 1.0875 | 0.435 | 192 | 95.9 | 63.9 | 32.0 | 16.0 | 6.39 |
| 4.36 | 2.180 | 1.0900 | 0.436 | 191 | 95.4 | 63.6 | 31.8 | 15.9 | 6.36 |
| 4.37 | 2.185 | 1.0925 | 0.437 | 190 | 95.0 | 63.3 | 31.7 | 15.8 | 6.33 |
| 4.38 | 2.190 | 1.0950 | 0.438 | 189 | 94.5 | 63.0 | 31.5 | 15.8 | 6.30 |
| 4.39 | 2.195 | 1.0975 | 0.439 | 188 | 94.1 | 62.7 | 31.4 | 15.7 | 6.27 |
| 4.40 | 2.200 | 1.1000 | 0.440 | 187 | 93.6 | 62.4 | 31.2 | 15.6 | 6.24 |
| 4.41 | 2.205 | 1.1025 | 0.441 | 186 | 93.2 | 62.1 | 31.1 | 15.5 | 6.21 |
| 4.42 | 2.210 | 1.1050 | 0.442 | 185 | 92.7 | 61.8 | 30.9 | 15.5 | 6.18 |
| 4.43 | 2.215 | 1.1075 | 0.443 | 185 | 92.3 | 61.5 | 30.8 | 15.4 | 6.15 |
| 4.44 | 2.220 | 1.1100 | 0.444 | 184 | 91.8 | 61.2 | 30.6 | 15.3 | 6.12 |
| 4.45 | 2.225 | 1.1125 | 0.445 | 183 | 91.4 | 60.9 | 30.5 | 15.2 | 6.09 |
| 4.46 | 2.230 | 1.1150 | 0.446 | 182 | 91.0 | 60.6 | 30.3 | 15.2 | 6.06 |
| 4.47 | 2.235 | 1.1175 | 0.447 | 181 | 90.5 | 60.4 | 30.2 | 15.1 | 6.04 |
| 4.48 | 2.240 | 1.1200 | 0.448 | 180 | 90.1 | 60.1 | 30.0 | 15.0 | 6.01 |
| 4.49 | 2.245 | 1.1225 | 0.449 | 179 | 89.7 | 59.8 | 29.9 | 14.9 | 5.98 |
| 4.50 | 2.250 | 1.1250 | 0.450 | 179 | 89.3 | 59.5 | 29.8 | 14.9 | 5.95 |
| 4.51 | 2.255 | 1.1275 | 0.451 | 178 | 88.9 | 59.2 | 29.6 | 14.8 | 5.92 |
| 4.52 | 2.260 | 1.1300 | 0.452 | 177 | 88.4 | 59.0 | 29.5 | 14.7 | 5.90 |
| 4.53 | 2.265 | 1.1325 | 0.453 | 176 | 88.0 | 58.7 | 29.3 | 14.7 | 5.87 |

（续）

| 硬质合金球直径 D/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 F | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 d/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 4.54 | 2.270 | 1.1350 | 0.454 | 175 | 87.6 | 58.4 | 29.2 | 14.6 | 5.84 |
| 4.55 | 2.275 | 1.1375 | 0.455 | 174 | 87.2 | 58.1 | 29.1 | 14.5 | 5.81 |
| 4.56 | 2.280 | 1.1400 | 0.456 | 174 | 86.8 | 57.9 | 28.9 | 14.5 | 5.79 |
| 4.57 | 2.285 | 1.1425 | 0.457 | 173 | 86.4 | 57.6 | 28.8 | 14.4 | 5.76 |
| 4.58 | 2.290 | 1.1450 | 0.458 | 172 | 86.0 | 57.3 | 28.7 | 14.3 | 5.73 |
| 4.59 | 2.295 | 1.1475 | 0.459 | 171 | 85.6 | 57.1 | 28.5 | 14.3 | 5.71 |
| 4.60 | 2.300 | 1.1500 | 0.460 | 170 | 85.2 | 56.8 | 28.4 | 14.2 | 5.68 |
| 4.61 | 2.305 | 1.1525 | 0.461 | 170 | 84.8 | 56.5 | 28.3 | 14.1 | 5.65 |
| 4.62 | 2.310 | 1.1550 | 0.462 | 169 | 84.4 | 56.3 | 28.1 | 14.1 | 5.63 |
| 4.63 | 2.315 | 1.1575 | 0.463 | 168 | 84.0 | 56.0 | 28.0 | 14.0 | 5.60 |
| 4.64 | 2.320 | 1.1600 | 0.464 | 167 | 83.6 | 55.8 | 27.9 | 13.9 | 5.58 |
| 4.65 | 2.325 | 1.1625 | 0.465 | 167 | 83.3 | 55.5 | 27.8 | 13.9 | 5.55 |
| 4.66 | 2.330 | 1.1650 | 0.466 | 166 | 82.9 | 55.3 | 27.6 | 13.8 | 5.53 |
| 4.67 | 2.335 | 1.1675 | 0.467 | 165 | 82.5 | 55.0 | 27.5 | 13.8 | 5.50 |
| 4.68 | 2.340 | 1.1700 | 0.468 | 164 | 82.1 | 54.8 | 27.4 | 13.7 | 5.48 |
| 4.69 | 2.345 | 1.1725 | 0.469 | 164 | 81.8 | 54.5 | 27.3 | 13.6 | 5.45 |
| 4.70 | 2.350 | 1.1750 | 0.470 | 163 | 81.4 | 54.3 | 27.1 | 13.6 | 5.43 |
| 4.71 | 2.355 | 1.1775 | 0.471 | 162 | 81.0 | 54.0 | 27.0 | 13.5 | 5.40 |
| 4.72 | 2.360 | 1.1800 | 0.472 | 161 | 80.7 | 53.8 | 26.9 | 13.4 | 5.38 |
| 4.73 | 2.365 | 1.1825 | 0.473 | 161 | 80.3 | 53.5 | 26.8 | 13.4 | 5.35 |
| 4.74 | 2.370 | 1.1850 | 0.474 | 160 | 79.9 | 53.3 | 26.6 | 13.3 | 5.33 |
| 4.75 | 2.375 | 1.1875 | 0.475 | 159 | 79.6 | 53.0 | 26.5 | 13.3 | 5.30 |
| 4.76 | 2.380 | 1.1900 | 0.476 | 158 | 79.2 | 52.8 | 26.4 | 13.2 | 5.28 |
| 4.77 | 2.385 | 1.1925 | 0.477 | 158 | 78.9 | 52.6 | 26.3 | 13.1 | 5.26 |
| 4.78 | 2.390 | 1.1950 | 0.478 | 157 | 78.5 | 52.3 | 26.2 | 13.1 | 5.23 |
| 4.79 | 2.395 | 1.1975 | 0.479 | 156 | 78.2 | 52.1 | 26.1 | 13.0 | 5.21 |
| 4.80 | 2.400 | 1.2000 | 0.480 | 156 | 77.8 | 51.9 | 25.9 | 13.0 | 5.19 |
| 4.81 | 2.405 | 1.2025 | 0.481 | 155 | 77.5 | 51.6 | 25.8 | 12.9 | 5.16 |
| 4.82 | 2.410 | 1.2050 | 0.482 | 154 | 77.1 | 51.4 | 25.7 | 12.9 | 5.14 |
| 4.83 | 2.415 | 1.2075 | 0.483 | 154 | 76.8 | 51.2 | 25.6 | 12.8 | 5.12 |
| 4.84 | 2.420 | 1.2100 | 0.484 | 153 | 76.4 | 51.0 | 25.5 | 12.7 | 5.10 |
| 4.85 | 2.425 | 1.2125 | 0.485 | 152 | 76.1 | 50.7 | 25.4 | 12.7 | 5.07 |
| 4.86 | 2.430 | 1.2150 | 0.486 | 152 | 75.8 | 50.5 | 25.3 | 12.6 | 5.05 |
| 4.87 | 2.435 | 1.2175 | 0.487 | 151 | 75.4 | 50.3 | 25.1 | 12.6 | 5.03 |
| 4.88 | 2.440 | 1.2200 | 0.488 | 150 | 75.1 | 50.1 | 25.0 | 12.5 | 5.01 |
| 4.89 | 2.445 | 1.2225 | 0.489 | 150 | 74.8 | 49.8 | 24.9 | 12.5 | 4.98 |
| 4.90 | 2.450 | 1.2250 | 0.490 | 149 | 74.4 | 49.6 | 24.8 | 12.4 | 4.96 |
| 4.91 | 2.455 | 1.2275 | 0.491 | 148 | 74.1 | 49.4 | 24.7 | 12.4 | 4.94 |

（续）

| 硬质合金球直径 $D$/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 $d$/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 4.92 | 2.460 | 1.2300 | 0.492 | 148 | 73.8 | 49.2 | 24.6 | 12.3 | 4.92 |
| 4.93 | 2.465 | 1.2325 | 0.493 | 147 | 73.5 | 49.0 | 24.5 | 12.2 | 4.90 |
| 4.94 | 2.470 | 1.2350 | 0.494 | 146 | 73.2 | 48.8 | 24.4 | 12.2 | 4.88 |
| 4.95 | 2.475 | 1.2375 | 0.495 | 146 | 72.8 | 48.6 | 24.3 | 12.1 | 4.86 |
| 4.96 | 2.480 | 1.2400 | 0.496 | 145 | 72.5 | 48.3 | 24.2 | 12.1 | 4.83 |
| 4.97 | 2.485 | 1.2425 | 0.497 | 144 | 72.2 | 48.1 | 24.1 | 12.0 | 4.81 |
| 4.98 | 2.490 | 1.2450 | 0.498 | 144 | 71.9 | 47.9 | 24.0 | 12.0 | 4.79 |
| 4.99 | 2.495 | 1.2475 | 0.499 | 143 | 71.6 | 47.7 | 23.9 | 11.9 | 4.77 |
| 5.00 | 2.500 | 1.2500 | 0.500 | 143 | 71.3 | 47.5 | 23.8 | 11.9 | 4.75 |
| 5.01 | 2.505 | 1.2525 | 0.501 | 142 | 71.0 | 47.3 | 23.7 | 11.8 | 4.73 |
| 5.02 | 2.510 | 1.2550 | 0.502 | 141 | 70.7 | 47.1 | 23.6 | 11.8 | 4.71 |
| 5.03 | 2.515 | 1.2575 | 0.503 | 141 | 70.4 | 46.9 | 23.5 | 11.7 | 4.69 |
| 5.04 | 2.520 | 1.2600 | 0.504 | 140 | 70.1 | 46.7 | 23.4 | 11.7 | 4.67 |
| 5.05 | 2.525 | 1.2625 | 0.505 | 140 | 69.8 | 46.5 | 23.3 | 11.6 | 4.65 |
| 5.06 | 2.530 | 1.2650 | 0.506 | 139 | 69.5 | 46.3 | 23.2 | 11.6 | 4.63 |
| 5.07 | 2.535 | 1.2675 | 0.507 | 138 | 69.2 | 46.1 | 23.1 | 11.5 | 4.61 |
| 5.08 | 2.540 | 1.2700 | 0.508 | 138 | 68.9 | 45.9 | 23.0 | 11.5 | 4.59 |
| 5.09 | 2.545 | 1.2725 | 0.509 | 137 | 68.6 | 45.7 | 22.9 | 11.4 | 4.57 |
| 5.10 | 2.550 | 1.2750 | 0.510 | 137 | 68.3 | 45.5 | 22.8 | 11.4 | 4.55 |
| 5.11 | 2.555 | 1.2775 | 0.511 | 136 | 68.0 | 45.3 | 22.7 | 11.3 | 4.51 |
| 5.12 | 2.560 | 1.2800 | 0.512 | 135 | 67.7 | 45.1 | 22.6 | 11.3 | 4.51 |
| 5.13 | 2.565 | 1.2825 | 0.513 | 135 | 67.4 | 45.0 | 22.5 | 11.2 | 4.50 |
| 5.14 | 2.570 | 1.2850 | 0.514 | 134 | 67.1 | 44.8 | 22.4 | 11.2 | 4.48 |
| 5.15 | 2.575 | 1.2875 | 0.515 | 134 | 66.9 | 44.6 | 22.3 | 11.1 | 4.46 |
| 5.16 | 2.580 | 1.2900 | 0.516 | 133 | 66.6 | 44.4 | 22.2 | 11.1 | 4.44 |
| 5.17 | 2.585 | 1.2925 | 0.517 | 133 | 66.3 | 44.2 | 22.1 | 11.1 | 4.42 |
| 5.18 | 2.590 | 1.2950 | 0.518 | 132 | 66.0 | 44.0 | 22.0 | 11.0 | 4.40 |
| 5.19 | 2.595 | 1.2975 | 0.519 | 132 | 65.8 | 43.8 | 21.9 | 11.0 | 4.38 |
| 5.20 | 2.600 | 1.3000 | 0.520 | 131 | 65.5 | 43.7 | 21.8 | 10.9 | 4.37 |
| 5.21 | 2.605 | 1.3025 | 0.521 | 130 | 65.2 | 43.5 | 21.7 | 10.9 | 4.35 |
| 5.22 | 2.610 | 1.3050 | 0.522 | 130 | 64.9 | 43.3 | 21.6 | 10.8 | 4.33 |
| 5.23 | 2.615 | 1.3075 | 0.523 | 129 | 64.7 | 43.1 | 21.6 | 10.8 | 4.31 |
| 5.24 | 2.620 | 1.3100 | 0.524 | 129 | 64.4 | 42.9 | 21.5 | 10.7 | 4.29 |
| 5.25 | 2.625 | 1.3125 | 0.525 | 128 | 64.1 | 42.8 | 21.4 | 10.7 | 4.28 |
| 5.26 | 2.630 | 1.3150 | 0.526 | 128 | 63.9 | 42.6 | 21.3 | 10.6 | 4.26 |
| 5.27 | 2.635 | 1.3175 | 0.527 | 127 | 63.6 | 42.4 | 21.2 | 10.6 | 4.24 |
| 5.28 | 2.640 | 1.3200 | 0.528 | 127 | 63.3 | 42.2 | 21.1 | 10.6 | 4.22 |
| 5.29 | 2.645 | 1.3225 | 0.529 | 126 | 63.1 | 42.1 | 21.0 | 10.5 | 4.21 |

（续）

| 硬质合金球直径 $D$/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 $d$/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 5.30 | 2.650 | 1.3250 | 0.530 | 126 | 62.8 | 41.9 | 20.9 | 10.5 | 4.19 |
| 5.31 | 2.655 | 1.3275 | 0.531 | 125 | 62.6 | 41.7 | 20.9 | 10.4 | 4.17 |
| 5.32 | 2.660 | 1.3300 | 0.532 | 125 | 62.3 | 41.5 | 20.8 | 10.4 | 4.15 |
| 5.33 | 2.665 | 1.3325 | 0.533 | 124 | 62.1 | 41.4 | 20.7 | 10.3 | 4.14 |
| 5.34 | 2.670 | 1.3350 | 0.534 | 124 | 61.8 | 41.2 | 20.6 | 10.3 | 4.12 |
| 5.35 | 2.675 | 1.3375 | 0.535 | 123 | 61.5 | 41.0 | 20.5 | 10.3 | 4.10 |
| 5.36 | 2.680 | 1.3400 | 0.536 | 123 | 61.3 | 40.9 | 20.4 | 10.2 | 4.09 |
| 5.37 | 2.685 | 1.3425 | 0.537 | 122 | 61.0 | 40.7 | 20.3 | 10.2 | 4.07 |
| 5.38 | 2.690 | 1.3450 | 0.538 | 122 | 60.8 | 40.5 | 20.3 | 10.1 | 4.05 |
| 5.39 | 2.695 | 1.3475 | 0.539 | 121 | 60.6 | 40.4 | 20.2 | 10.1 | 4.04 |
| 5.40 | 2.700 | 1.3500 | 0.540 | 121 | 60.3 | 40.2 | 20.1 | 10.1 | 4.02 |
| 5.41 | 2.705 | 1.3525 | 0.541 | 120 | 60.1 | 40.0 | 20.0 | 10.0 | 4.00 |
| 5.42 | 2.710 | 1.3550 | 0.542 | 120 | 59.8 | 39.9 | 19.9 | 9.97 | 3.99 |
| 5.43 | 2.715 | 1.3575 | 0.543 | 119 | 59.6 | 39.7 | 19.9 | 9.93 | 3.97 |
| 5.44 | 2.720 | 1.3600 | 0.544 | 118 | 59.3 | 39.6 | 19.8 | 9.89 | 3.96 |
| 5.45 | 2.725 | 1.3625 | 0.545 | 118 | 59.1 | 39.4 | 19.7 | 9.85 | 3.94 |
| 5.46 | 2.730 | 1.3650 | 0.546 | 118 | 58.9 | 39.2 | 19.6 | 9.81 | 3.92 |
| 5.47 | 2.735 | 1.3675 | 0.547 | 117 | 58.6 | 39.1 | 19.5 | 9.77 | 3.91 |
| 5.48 | 2.740 | 1.3700 | 0.548 | 117 | 58.4 | 38.9 | 19.5 | 9.73 | 3.89 |
| 5.49 | 2.745 | 1.3725 | 0.549 | 116 | 58.2 | 38.8 | 19.4 | 9.69 | 3.88 |
| 5.50 | 2.750 | 1.3750 | 0.550 | 116 | 57.9 | 38.6 | 19.3 | 9.66 | 3.86 |
| 5.51 | 2.755 | 1.3775 | 0.551 | 115 | 57.7 | 38.5 | 19.2 | 9.62 | 3.85 |
| 5.52 | 2.760 | 1.3800 | 0.552 | 115 | 57.5 | 38.3 | 19.2 | 9.58 | 3.83 |
| 5.53 | 2.765 | 1.3825 | 0.553 | 114 | 57.2 | 38.2 | 19.1 | 9.54 | 3.82 |
| 5.54 | 2.770 | 1.3850 | 0.554 | 114 | 57.0 | 38.0 | 19.0 | 9.50 | 3.80 |
| 5.55 | 2.775 | 1.3875 | 0.555 | 114 | 56.8 | 37.9 | 18.9 | 9.47 | 3.79 |
| 5.56 | 2.780 | 1.3900 | 0.556 | 113 | 56.6 | 37.7 | 18.9 | 9.43 | 3.77 |
| 5.57 | 2.785 | 1.3925 | 0.557 | 113 | 56.3 | 37.6 | 18.8 | 9.39 | 3.76 |
| 5.58 | 2.790 | 1.3950 | 0.558 | 112 | 56.1 | 37.4 | 18.7 | 9.35 | 3.74 |
| 5.59 | 2.795 | 1.3975 | 0.559 | 112 | 55.9 | 37.3 | 18.6 | 9.32 | 3.73 |
| 5.60 | 2.800 | 1.4000 | 0.560 | 111 | 55.7 | 37.1 | 18.6 | 9.28 | 3.71 |
| 5.61 | 2.805 | 1.4025 | 0.561 | 111 | 55.5 | 37.0 | 18.5 | 9.24 | 3.70 |
| 5.62 | 2.810 | 1.4050 | 0.562 | 110 | 55.2 | 36.8 | 18.4 | 9.21 | 3.68 |
| 5.63 | 2.815 | 1.4075 | 0.563 | 110 | 55.0 | 36.7 | 18.3 | 9.17 | 3.67 |
| 5.64 | 2.820 | 1.4100 | 0.564 | 110 | 54.8 | 36.5 | 18.3 | 9.14 | 3.65 |
| 5.65 | 2.825 | 1.4125 | 0.565 | 109 | 54.6 | 36.4 | 18.2 | 9.10 | 3.64 |
| 5.66 | 2.830 | 1.4150 | 0.566 | 109 | 54.4 | 36.3 | 18.1 | 9.06 | 3.63 |
| 5.67 | 2.835 | 1.4175 | 0.567 | 108 | 54.2 | 36.1 | 18.1 | 9.03 | 3.61 |

（续）

| 硬质合金球直径 $D$/mm | | | | 试验力-球直径平方的比率 $0.102F/D^2$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 30 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1 |
| | | | | 试验力 $F$ | | | | | |
| 10 | | | | 29.42kN | 14.71kN | 9.807kN | 4.903kN | 2.452kN | 980.7kN |
| | 5 | | | 7.355kN | — | 2.452kN | 1.226kN | 612.9N | 245.2N |
| | | 2.5 | | 1.839kN | — | 612.9N | 306.5N | 153.2N | 61.29N |
| | | | 1 | 294.2N | — | 98.07N | 49.03N | 24.52N | 9.807N |
| 压痕的平均直径 $d$/mm | | | | 布氏硬度 HBW | | | | | |
| 5.68 | 2.840 | 1.4200 | 0.568 | 108 | 54.0 | 36.0 | 18.0 | 8.99 | 3.60 |
| 5.69 | 2.845 | 1.4225 | 0.569 | 107 | 53.7 | 35.8 | 17.9 | 8.96 | 3.58 |
| 5.70 | 2.850 | 1.4250 | 0.570 | 107 | 53.5 | 35.7 | 17.8 | 8.92 | 3.57 |
| 5.71 | 2.855 | 1.4275 | 0.571 | 107 | 53.3 | 35.6 | 17.8 | 8.89 | 3.56 |
| 5.72 | 2.860 | 1.4300 | 0.572 | 106 | 53.1 | 35.4 | 17.7 | 8.85 | 3.54 |
| 5.73 | 2.865 | 1.4325 | 0.573 | 106 | 52.9 | 35.3 | 17.6 | 8.82 | 3.53 |
| 5.74 | 2.870 | 1.4350 | 0.574 | 105 | 52.7 | 35.1 | 17.6 | 8.79 | 3.51 |
| 5.75 | 2.875 | 1.4375 | 0.575 | 105 | 52.5 | 35.0 | 17.5 | 8.75 | 3.50 |
| 5.76 | 2.880 | 1.4400 | 0.576 | 105 | 52.3 | 34.9 | 17.4 | 8.72 | 3.49 |
| 5.77 | 2.885 | 1.4425 | 0.577 | 104 | 52.1 | 34.7 | 17.4 | 8.68 | 3.47 |
| 5.78 | 2.890 | 1.4450 | 0.578 | 104 | 51.9 | 34.6 | 17.3 | 8.65 | 3.46 |
| 5.79 | 2.895 | 1.4475 | 0.579 | 103 | 51.7 | 34.5 | 17.2 | 8.62 | 3.45 |
| 5.80 | 2.900 | 1.4500 | 0.580 | 103 | 51.5 | 34.3 | 17.2 | 8.59 | 3.43 |
| 5.81 | 2.905 | 1.4525 | 0.581 | 103 | 51.3 | 34.2 | 17.1 | 8.55 | 3.42 |
| 5.82 | 2.910 | 1.4550 | 0.582 | 102 | 51.1 | 34.1 | 17.0 | 8.52 | 3.41 |
| 5.83 | 2.915 | 1.4575 | 0.583 | 102 | 50.9 | 33.9 | 17.0 | 8.49 | 3.39 |
| 5.84 | 2.920 | 1.4600 | 0.584 | 101 | 50.7 | 33.8 | 16.9 | 8.45 | 3.38 |
| 5.85 | 2.925 | 1.4625 | 0.585 | 101 | 50.5 | 33.7 | 16.8 | 8.42 | 3.37 |
| 5.86 | 2.930 | 1.4650 | 0.586 | 101 | 50.3 | 33.6 | 16.8 | 8.39 | 3.36 |
| 5.87 | 2.935 | 1.4675 | 0.587 | 100 | 50.2 | 33.4 | 16.7 | 8.36 | 3.34 |
| 5.88 | 2.940 | 1.4700 | 0.588 | 99.9 | 50.0 | 33.3 | 16.7 | 8.33 | 3.33 |
| 5.89 | 2.945 | 1.4725 | 0.589 | 99.5 | 49.8 | 33.2 | 16.6 | 8.30 | 3.32 |
| 5.90 | 2.950 | 1.4750 | 0.590 | 99.2 | 49.6 | 33.1 | 16.5 | 8.26 | 3.31 |
| 5.91 | 2.955 | 1.4775 | 0.591 | 98.8 | 49.4 | 32.9 | 16.5 | 8.23 | 3.29 |
| 5.92 | 2.960 | 1.4800 | 0.592 | 98.4 | 49.2 | 32.8 | 16.4 | 8.20 | 3.28 |
| 5.93 | 2.965 | 1.4825 | 0.593 | 98.0 | 49.0 | 32.7 | 16.3 | 8.17 | 3.27 |
| 5.94 | 2.970 | 1.4850 | 0.594 | 97.7 | 48.8 | 32.6 | 16.3 | 8.14 | 3.26 |
| 5.95 | 2.975 | 1.4875 | 0.595 | 97.3 | 48.7 | 32.4 | 16.2 | 8.11 | 3.24 |
| 5.96 | 2.980 | 1.4900 | 0.596 | 96.9 | 48.5 | 32.3 | 16.2 | 8.08 | 3.23 |
| 5.97 | 2.985 | 1.4925 | 0.597 | 96.6 | 48.3 | 32.2 | 16.1 | 8.05 | 3.22 |
| 5.98 | 2.990 | 1.4950 | 0.598 | 96.2 | 48.1 | 32.1 | 16.0 | 8.02 | 3.21 |
| 5.99 | 2.995 | 1.4975 | 0.599 | 95.9 | 47.9 | 32.0 | 16.0 | 7.99 | 3.20 |
| 6.00 | 3.000 | 1.5000 | 0.600 | 95.5 | 47.7 | 31.8 | 15.9 | 7.96 | 3.18 |

**5. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，修约至 0.5HBW。

## 3.4　金属材料维氏硬度试验

金属材料维氏硬度试验按照 GB/T 4340.1—2009《金属材料　维氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》、GB/T 4340.2—2012《金属材料　维氏硬度试验　第 2 部分：硬度计的检验与校准》、GB/T 4340.3—2012《金属材料　维氏硬度试验　第 3 部分：标准硬度块的标定》和 GB/T 4340.4—2009《金属材料　维氏硬度试验　第 4 部分：硬度值表》进行。

### 3.4.1　试样

1）试样表面应平坦光滑，试验面上应无氧化皮及外来污物，尤其不应有油脂，除非在产品标准中另有规定。试样表面的质量应保证压痕对角线长度的测量精度，建议试样表面进行表面抛光处理。

2）制备试样时，应使由于过热或冷加工等因素对试样表面硬度的影响减至最小。

3）由于显微维氏硬度压痕很浅，加工试样时建议根据材料特性采用抛光/电解抛光工艺。

4）试样或试验层厚度至少应为压痕对角线长度的 1.5 倍，如图 3-6 和图 3-7 所示。试验后，试样背面不应出现可见变形压痕。

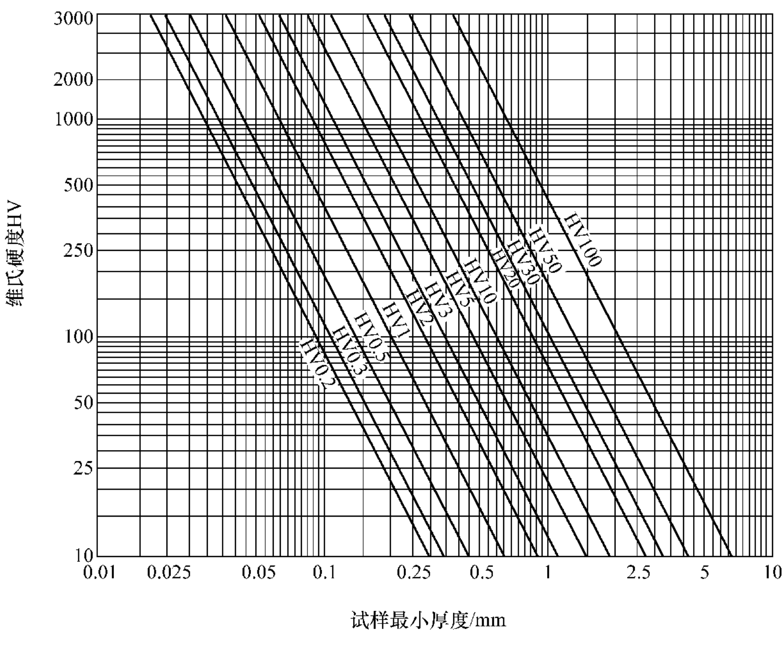



图 3-6　试样最小厚度-试验力-硬度关系图（HV0.2 ~ HV100）

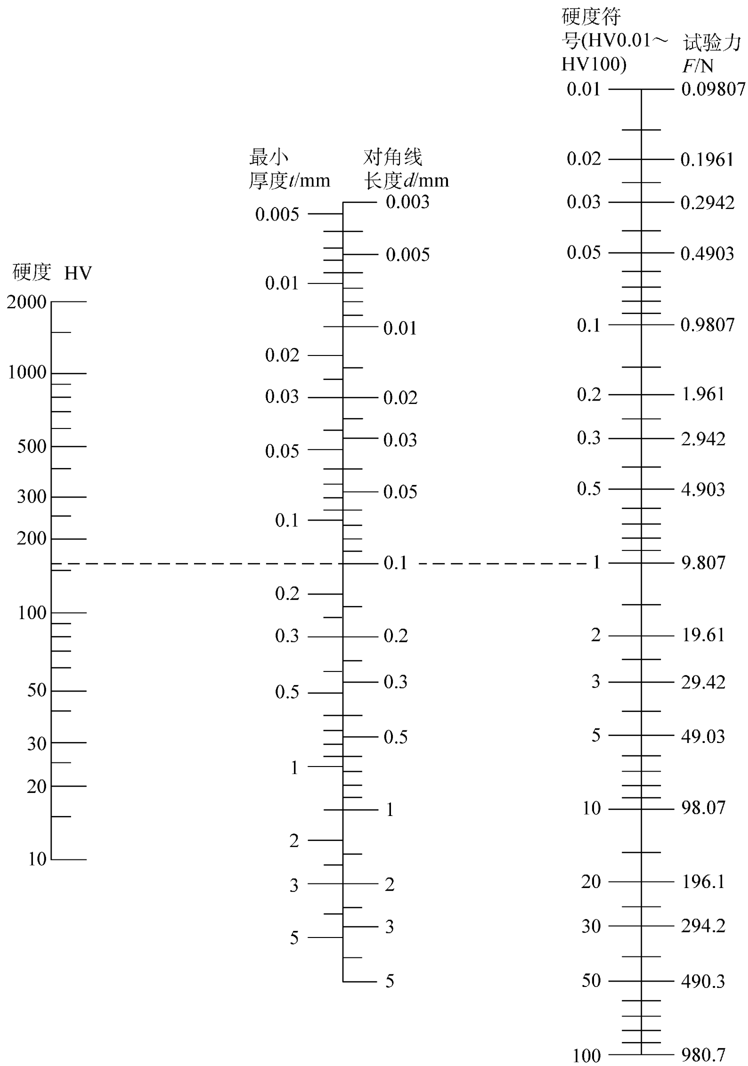



图 3-7　试样最小厚度图（HV0. 01 ~ HV100）

使用图 3-7 时，将右边标尺选定的试验力和左边标尺硬度值做一连接线，此连接线与中间标尺的交点示出的值为该条件下的试样最小厚度。

5）试样表面的质量应能保证压痕对角线长度的精确测量，表面粗糙度符合表 3-12 的要求。

表 3-12　维氏硬度表面粗糙度值要求

| 试样类型 | 表面粗糙度 $Ra/\mu m \leqslant$ |
|---|---|
| 维氏硬度试样 | 0.4 |
| 小负荷维氏硬度试样 | 0.2 |
| 显微维氏硬度试样 | 0.1 |

## 3.4.2　试验设备

维氏硬度计分为普通维氏硬度计、小负荷维氏硬度计和显微维氏硬度计。普通维氏硬度计一般指负荷在98.1～490.4N（10～50kgf）的维氏硬度试验机，小负荷维氏硬度计一般指最大负荷为49.04N（5kgf）的维氏硬度试验机，显微维氏硬度计一般指最大负荷为9.81N（1kgf）的维氏硬度试验机。

维氏硬度计试验测量范围宽广，可以测量目前工业上所用到的几乎全部金属材料，从很软的材料（几个维氏硬度单位）到很硬的材料（3000 个维氏硬度单位）都可测量。维氏硬度试验主要用于材料研究和科学试验方面，小负荷维氏硬度试验主要用于测试小型精密零件的硬度、表面硬化层硬度和有效硬化层深度、镀层的表面硬度、薄片材料和细线材的硬度、刀刃附近的硬度、牙科材料的硬度等。由于试验力很小，压痕也很小，试样外观和使用性能都可以不受影响。显微维氏硬氏试验主要用于金属学和金相学研究，用于测定金属组织中各组成相的硬度、研究难熔化合物脆性等。显微维氏硬度试验还可用于极小或极薄零件的测试，零件厚度可薄至 3μm。

维氏硬度计试验最大的优点在于其硬度值与试验力的大小无关，只要是硬度均匀的材料，可以任意选择试验力，其硬度值不变。这就相当于在一个很宽广的硬度范围内具有一个统一的标尺。维氏硬度试验是常用硬度试验方法中精度最高的，同时它的重复性也很好。维氏硬度计如图 3-8 所示。

使用者应在使用硬度计之前，对其使用的硬度标尺或范围进行检查。

日常检查之前，对于每个范围/标尺和硬度水平，应使用依照 GB/T 4340.3 标定过的标准硬度块上的标准压痕进行压痕测量装置的间接检验。压痕测量值应与标准硬度块证书上的标准值相差在 GB/T 4340.2 给出的最大允许误差以内。如果测量装置不能满足上述要求，应采取相应措施。

日常检查应在按照 GB/T 4340.3 标定的标准硬度块上至少打一个压痕。如果测量的硬度（平均）值与标准硬度块标准值的差值在 GB/T 4340.2 中给出的允许误差之内，则硬度计被认为是满意的；如果超出允许误差，应立即进行间接检验。


图 3-8　维氏硬度计

## 3.4.3 试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在10～35℃的温度下进行。对于温度要求严格的试验，应控制在23℃±5℃之内。

2）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，以避免试样产生位移。

3）试验过程中，硬度计应避免受到冲击和振动。

4）每个试样上的试验点数不少于4点，第1点不计。

5）在大量试验前或距前一试验超过24h，以及压头或支承台移动或重新安装后，均应进行检定，上述调整后的第一次试验结果不作为正式数据。

6）使用表3-13中所示的各级试验力。

**表3-13 不同条件下的试验力**

| 维氏硬度试验 | | 小力值维氏硬度试验 | | 显微维氏硬度试验 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 硬度符号 | 试验力标称值/N | 硬度符号 | 试验力标称值/N | 硬度符号 | 试验力标称值 /N |
| HV5 | 49.03 | HV0.2 | 1.961 | HV0.01 | 0.09807 |
| HV10 | 98.07 | HV0.3 | 2.942 | HV0.015 | 0.1471 |
| HV20 | 196.1 | HV0.5 | 4.903 | HV0.02 | 0.1961 |
| HV30 | 294.2 | HV1 | 9.807 | HV0.025 | 0.2452 |
| HV50 | 490.3 | HV2 | 19.61 | HV0.05 | 0.4903 |
| HV100 | 980.7 | HV3 | 29.42 | HV0.1 | 0.9807 |

注：1. 维氏硬度试验可使用大于980.7N的试验力。
2. 显微维氏硬度试验的试验力为推荐值。

**2. 试验原理**

将顶部两相对面具有规定角度（136°）的正四棱锥体金刚石压头以选定的试验力$F$压入试样表面，经保持规定时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕对角线长度，如图3-9所示。维氏硬度值是试验力除以压痕表面积所得的商，压痕被视为具有正方形基面并与压头角度相同的理想形状。

维氏硬度的计算如下：

$$\text{维氏硬度}=0.102\times\frac{F}{A}=0.102\times\frac{2F\sin\frac{136^\circ}{2}}{d^2}\approx\frac{0.1891F}{d^2}$$

即维氏硬度的计算公式为

$$\text{维氏硬度}=\frac{0.1891F}{d^2}$$

式中 0.102——试验力单位由kgf换为N后需要乘以的系数，即$1/g=1/9.80665=0.102$（$g$为标准重力加速度）；

$F$——试验力，单位为N；

$A$——压痕表面积，单位为 $mm^2$；

$d$——压痕平均对角线长度，单位为 mm，$d = (d_1 + d_2)/2$，$d_1$、$d_2$ 为测量的两对角线长度。

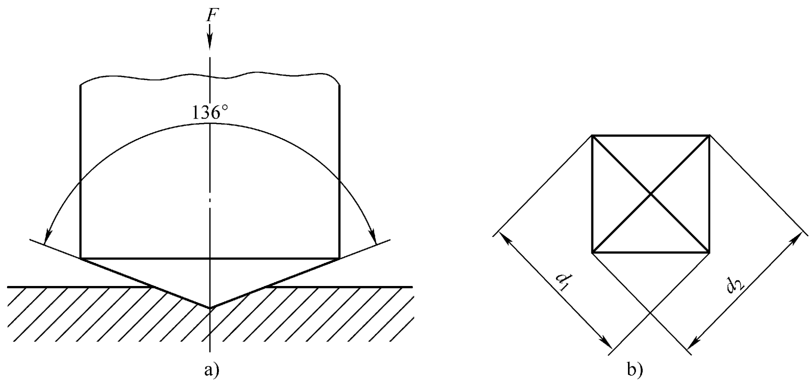



图 3-9　维氏硬度试验原理

a）压头（金刚石锥体）　b）维氏硬度压痕

**3. 硬度值的表示**

维氏硬度用 HV 表示，符号 HV 之前为硬度值，符号之后依次为选择的试验力值（见表 3-13）、试验力保持时间（10 ~ 15s 不标注）。例如：640HV30 表示在试验力为 294. 2 N（30kgf）下保持 10 ~ 15s 测定的维氏硬度值为 640；640HV30/20 表示在试验力为 294. 2 N（30kgf）下保持 20s 测定的维氏硬度值为 640。

**4. 试验程序**

1）使压头与试样表面接触，垂直于试验面施加试验力，加力过程中不应有冲击和振动，直至将试验力施加至规定值。从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应在 2 ~ 8s 之间。对于小负荷维氏硬度试验和显微维氏硬度试验，压头下降速度应不大于 0. 2mm/s；对于显微维氏硬度试验，压头下降速度应在 15 ~ 70μm/s 之间。

2）试验力保持时间为 10 ~ 15s。对于特殊材料，试验力保持时间可以延长，但误差应在 ±2s 之内。在整个试验期间，硬度计应避免受到冲击和振动。

3）任一压痕中心距试样边缘距离：对于钢、铜及铜合金至少应为压痕对角线长度的 2. 5 倍；对于轻金属、铅、锡及合金至少应为压痕对角线长度的 3 倍。两相邻压痕中心之间距离：对于钢、铜及铜合金至少应为压痕对角线长度的 3 倍；对于轻金属、铅、锡及合金至少应为压痕对角线长度的 6 倍。如果相邻两压痕大小不同，应以较大压痕确定压痕间距。

4）测量压痕两条对角线的长度，用公式计算硬度值。也可用其算术平均值按表 3-14 ~ 表 3-16 查出维氏硬度值。

5）在平面上压痕两对角线长度之差应不超过对角线平均值的 5%，如果超过 5%，必须在试验报告中注明。放大系统应能将对角线放大到视场的 25% ~75%。

表 3-14　平面维氏硬度值计算表（小于 HV0.2）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0200 | 4.64 | 9.27 | 23.18 | 46.36 | 92.72 | 115.9 | 231.8 | 463.6 |
| 0.0202 | 4.54 | 9.09 | 22.72 | 45.45 | 90.89 | 113.6 | 227.2 | 454.5 |
| 0.0204 | 4.46 | 8.91 | 22.28 | 44.56 | 89.12 | 111.4 | 222.8 | 445.6 |
| 0.0206 | 4.37 | 8.74 | 21.85 | 43.70 | 87.39 | 109.3 | 218.5 | 437.0 |
| 0.0208 | 4.29 | 8.57 | 21.43 | 42.86 | 85.72 | 107.2 | 214.3 | 428.6 |
| 0.0210 | 4.21 | 8.41 | 21.02 | 42.05 | 84.10 | 105.1 | 210.2 | 420.5 |
| 0.0212 | 4.13 | 8.25 | 20.63 | 41.26 | 82.52 | 103.2 | 206.3 | 412.6 |
| 0.0214 | 4.05 | 8.10 | 20.25 | 40.49 | 80.98 | 101.2 | 202.5 | 404.9 |
| 0.0216 | 3.97 | 7.95 | 19.87 | 39.75 | 79.49 | 99.38 | 198.7 | 397.5 |
| 0.0218 | 3.90 | 7.80 | 19.51 | 39.02 | 78.04 | 97.57 | 195.1 | 390.2 |
| 0.0220 | 3.83 | 7.66 | 19.16 | 38.32 | 76.62 | 95.80 | 191.6 | 383.2 |
| 0.0222 | 3.76 | 7.52 | 18.81 | 37.63 | 75.25 | 94.08 | 188.1 | 376.3 |
| 0.0224 | 3.70 | 7.39 | 18.48 | 36.96 | 73.91 | 92.41 | 184.8 | 369.6 |
| 0.0226 | 3.63 | 7.26 | 18.15 | 36.31 | 72.61 | 90.78 | 181.5 | 363.1 |
| 0.0228 | 3.57 | 7.13 | 17.84 | 35.67 | 71.34 | 89.20 | 178.4 | 356.7 |
| 0.0230 | 3.51 | 7.01 | 17.53 | 35.06 | 70.11 | 87.65 | 175.3 | 350.6 |
| 0.0232 | 3.45 | 6.89 | 17.23 | 34.45 | 68.90 | 86.15 | 172.3 | 344.5 |
| 0.0234 | 3.39 | 6.77 | 16.93 | 33.87 | 67.73 | 84.68 | 169.3 | 338.7 |
| 0.0236 | 3.33 | 6.66 | 16.65 | 33.30 | 66.59 | 83.25 | 166.5 | 333.0 |
| 0.0238 | 3.27 | 6.55 | 16.37 | 32.74 | 65.47 | 81.86 | 163.7 | 327.4 |
| 0.0240 | 3.22 | 6.44 | 16.10 | 32.20 | 64.39 | 80.50 | 161.0 | 322.0 |
| 0.0242 | 3.17 | 6.33 | 15.83 | 31.67 | 63.33 | 79.17 | 158.3 | 316.7 |
| 0.0244 | 3.11 | 6.23 | 15.57 | 31.15 | 62.29 | 77.88 | 155.7 | 311.5 |
| 0.0246 | 3.06 | 6.13 | 15.32 | 30.64 | 61.28 | 76.62 | 153.2 | 306.4 |
| 0.0248 | 3.02 | 6.03 | 15.07 | 30.15 | 60.30 | 75.39 | 150.7 | 301.5 |
| 0.0250 | 2.97 | 5.93 | 14.83 | 29.67 | 59.34 | 74.19 | 148.3 | 296.7 |
| 0.0252 | 2.92 | 5.84 | 14.60 | 29.20 | 58.40 | 73.01 | 146.0 | 292.0 |
| 0.0254 | 2.87 | 5.75 | 14.37 | 28.74 | 57.48 | 71.87 | 143.7 | 287.4 |
| 0.0256 | 2.83 | 5.66 | 14.15 | 28.30 | 56.59 | 70.75 | 141.5 | 283.0 |
| 0.0258 | 2.79 | 5.57 | 13.93 | 27.86 | 55.72 | 69.66 | 139.3 | 278.6 |
| 0.0260 | 2.74 | 5.49 | 13.72 | 27.43 | 54.86 | 68.59 | 137.2 | 274.3 |
| 0.0262 | 2.70 | 5.40 | 13.51 | 27.02 | 54.03 | 67.55 | 135.1 | 270.2 |
| 0.0264 | 2.66 | 5.32 | 13.30 | 26.61 | 53.21 | 66.53 | 133.0 | 266.1 |
| 0.0266 | 2.62 | 5.24 | 13.10 | 26.21 | 52.41 | 65.53 | 131.0 | 262.1 |
| 0.0268 | 2.58 | 5.16 | 12.91 | 25.82 | 51.63 | 64.56 | 129.1 | 258.2 |
| 0.0270 | 2.54 | 5.09 | 12.72 | 25.44 | 50.87 | 63.60 | 127.2 | 254.4 |
| 0.0272 | 2.51 | 5.01 | 12.53 | 25.07 | 50.13 | 62.67 | 125.3 | 250.7 |
| 0.0274 | 2.47 | 4.94 | 12.35 | 24.70 | 49.40 | 61.76 | 123.5 | 247.0 |
| 0.0276 | 2.43 | 4.87 | 12.17 | 24.34 | 48.69 | 60.87 | 121.7 | 243.4 |
| 0.0278 | 2.40 | 4.80 | 12.00 | 24.00 | 47.99 | 60.00 | 120.0 | 240.0 |
| 0.0280 | 2.37 | 4.73 | 11.83 | 23.65 | 47.30 | 59.14 | 118.3 | 236.5 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0282 | 2.33 | 4.66 | 11.66 | 23.32 | 46.64 | 58.31 | 116.6 | 233.2 |
| 0.0284 | 2.30 | 4.60 | 11.50 | 22.99 | 45.98 | 57.49 | 115.0 | 229.9 |
| 0.0286 | 2.27 | 4.53 | 11.33 | 22.67 | 45.34 | 56.69 | 113.3 | 226.7 |
| 0.0288 | 2.24 | 4.47 | 11.18 | 22.36 | 44.71 | 55.90 | 111.8 | 223.6 |
| 0.0290 | 2.21 | 4.41 | 11.02 | 22.05 | 44.10 | 55.13 | 110.2 | 220.5 |
| 0.0292 | 2.18 | 4.35 | 10.87 | 21.75 | 43.50 | 54.38 | 108.7 | 217.5 |
| 0.0294 | 2.15 | 4.29 | 10.73 | 21.46 | 42.91 | 53.64 | 107.3 | 214.6 |
| 0.0296 | 2.12 | 4.23 | 10.58 | 21.17 | 42.33 | 52.92 | 105.8 | 211.7 |
| 0.0298 | 2.09 | 4.18 | 10.44 | 20.88 | 41.76 | 52.21 | 104.4 | 208.8 |
| 0.0300 | 2.06 | 4.12 | 10.30 | 20.61 | 41.21 | 51.52 | 103.0 | 206.1 |
| 0.0302 | 2.03 | 4.07 | 10.17 | 20.33 | 40.66 | 50.84 | 101.7 | 203.3 |
| 0.0304 | 2.01 | 4.01 | 10.03 | 20.07 | 40.13 | 50.17 | 100.3 | 200.7 |
| 0.0306 | 1.98 | 3.96 | 9.90 | 19.81 | 39.61 | 49.52 | 99.02 | 198.1 |
| 0.0308 | 1.95 | 3.91 | 9.77 | 19.55 | 39.09 | 48.88 | 97.74 | 195.5 |
| 0.0310 | 1.93 | 3.86 | 9.65 | 19.30 | 38.59 | 48.25 | 96.48 | 193.0 |
| 0.0312 | 1.91 | 3.81 | 9.52 | 19.05 | 38.10 | 47.63 | 95.25 | 190.5 |
| 0.0314 | 1.88 | 3.76 | 9.40 | 18.81 | 37.61 | 47.03 | 94.04 | 188.1 |
| 0.0316 | 1.86 | 3.71 | 9.28 | 18.57 | 37.14 | 46.43 | 92.85 | 185.7 |
| 0.0318 | 1.83 | 3.67 | 9.17 | 18.34 | 36.67 | 45.85 | 91.69 | 183.4 |
| 0.0320 | 1.81 | 3.62 | 9.05 | 18.11 | 36.22 | 45.28 | 90.54 | 181.1 |
| 0.0322 | 1.79 | 3.58 | 8.94 | 17.89 | 35.77 | 44.72 | 89.42 | 178.9 |
| 0.0324 | 1.77 | 3.53 | 8.83 | 17.67 | 35.33 | 44.17 | 88.32 | 176.7 |
| 0.0326 | 1.74 | 3.49 | 8.72 | 17.45 | 34.90 | 43.63 | 87.24 | 174.5 |
| 0.0328 | 1.72 | 3.45 | 8.62 | 17.24 | 34.47 | 43.10 | 86.18 | 172.4 |
| 0.0330 | 1.70 | 3.41 | 8.51 | 17.03 | 34.06 | 42.58 | 85.14 | 170.3 |
| 0.0332 | 1.68 | 3.36 | 8.41 | 16.82 | 33.65 | 42.07 | 84.12 | 168.2 |
| 0.0334 | 1.66 | 3.32 | 8.31 | 16.62 | 33.24 | 41.56 | 83.11 | 166.2 |
| 0.0336 | 1.64 | 3.28 | 8.21 | 16.43 | 32.85 | 41.07 | 82.12 | 164.3 |
| 0.0338 | 1.62 | 3.25 | 8.12 | 16.23 | 32.46 | 40.59 | 81.16 | 162.3 |
| 0.0340 | 1.60 | 3.21 | 8.02 | 16.04 | 32.08 | 40.11 | 80.20 | 160.4 |
| 0.0342 | 1.59 | 3.17 | 7.93 | 15.86 | 31.71 | 39.64 | 79.27 | 158.6 |
| 0.0344 | 1.57 | 3.13 | 7.83 | 15.67 | 31.34 | 39.18 | 78.35 | 156.7 |
| 0.0346 | 1.55 | 3.10 | 7.74 | 15.49 | 30.98 | 38.73 | 77.45 | 154.9 |
| 0.0348 | 1.53 | 3.06 | 7.66 | 15.31 | 30.62 | 38.29 | 76.56 | 153.1 |
| 0.0350 | 1.51 | 3.03 | 7.57 | 15.14 | 30.27 | 37.85 | 75.69 | 151.4 |
| 0.0352 | 1.50 | 2.99 | 7.48 | 14.97 | 29.93 | 37.42 | 74.83 | 149.7 |
| 0.0354 | 1.48 | 2.96 | 7.40 | 14.80 | 29.59 | 37.00 | 73.99 | 148.0 |
| 0.0356 | 1.46 | 2.93 | 7.32 | 14.63 | 29.26 | 36.59 | 73.16 | 146.3 |
| 0.0358 | 1.45 | 2.89 | 7.23 | 14.47 | 28.94 | 36.18 | 72.34 | 144.7 |
| 0.0360 | 1.43 | 2.86 | 7.15 | 14.31 | 28.62 | 35.78 | 71.54 | 143.1 |
| 0.0362 | 1.42 | 2.83 | 7.08 | 14.15 | 28.30 | 35.38 | 70.75 | 141.5 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0364 | 1.40 | 2.80 | 7.00 | 14.00 | 27.99 | 35.00 | 69.98 | 140.0 |
| 0.0366 | 1.38 | 2.77 | 6.92 | 13.84 | 27.69 | 34.61 | 69.21 | 138.4 |
| 0.0368 | 1.37 | 2.74 | 6.85 | 13.69 | 27.39 | 34.24 | 68.46 | 136.9 |
| 0.0370 | 1.35 | 2.71 | 6.77 | 13.55 | 27.09 | 33.87 | 67.73 | 135.5 |
| 0.0372 | 1.34 | 2.68 | 6.70 | 13.40 | 26.80 | 33.51 | 67.00 | 134.0 |
| 0.0374 | 1.33 | 2.65 | 6.63 | 13.26 | 26.51 | 33.15 | 66.28 | 132.6 |
| 0.0376 | 1.31 | 2.62 | 6.56 | 13.12 | 26.23 | 32.80 | 65.58 | 131.2 |
| 0.0378 | 1.30 | 2.60 | 6.49 | 12.98 | 25.96 | 32.45 | 64.89 | 129.8 |
| 0.0380 | 1.28 | 2.57 | 6.42 | 12.84 | 25.68 | 32.11 | 64.21 | 128.4 |
| 0.0382 | 1.27 | 2.54 | 6.35 | 12.71 | 25.41 | 31.77 | 63.54 | 127.1 |
| 0.0384 | 1.26 | 2.51 | 6.29 | 12.58 | 25.15 | 31.44 | 62.88 | 125.8 |
| 0.0386 | 1.24 | 2.49 | 6.22 | 12.45 | 24.89 | 31.12 | 62.23 | 124.5 |
| 0.0388 | 1.23 | 2.46 | 6.16 | 12.32 | 24.63 | 30.80 | 61.59 | 123.2 |
| 0.0390 | 1.22 | 2.44 | 6.10 | 12.19 | 24.38 | 30.48 | 60.96 | 121.9 |
| 0.0392 | 1.21 | 2.41 | 6.03 | 12.07 | 24.13 | 30.17 | 60.34 | 120.7 |
| 0.0394 | 1.19 | 2.39 | 5.97 | 11.95 | 23.89 | 29.87 | 59.73 | 119.5 |
| 0.0396 | 1.18 | 2.36 | 5.91 | 11.83 | 23.65 | 29.57 | 59.12 | 118.3 |
| 0.0398 | 1.17 | 2.34 | 5.85 | 11.71 | 23.41 | 29.27 | 58.53 | 117.1 |
| 0.0400 | 1.16 | 2.32 | 5.79 | 11.59 | 23.18 | 28.98 | 57.95 | 115.9 |
| 0.0402 | 1.15 | 2.29 | 5.74 | 11.48 | 22.95 | 28.69 | 57.37 | 114.8 |
| 0.0404 | 1.14 | 2.27 | 5.68 | 11.36 | 22.72 | 28.41 | 56.81 | 113.6 |
| 0.0406 | 1.13 | 2.25 | 5.62 | 11.25 | 22.50 | 28.13 | 56.25 | 112.5 |
| 0.0408 | 1.11 | 2.23 | 5.57 | 11.14 | 22.28 | 27.85 | 55.70 | 111.4 |
| 0.0410 | 1.10 | 2.21 | 5.52 | 11.03 | 22.06 | 27.58 | 55.16 | 110.3 |
| 0.0412 | 1.09 | 2.18 | 5.46 | 10.93 | 21.85 | 27.32 | 54.62 | 109.3 |
| 0.0414 | 1.08 | 2.16 | 5.41 | 10.82 | 21.64 | 27.05 | 54.09 | 108.2 |
| 0.0416 | 1.07 | 2.14 | 5.36 | 10.72 | 21.43 | 26.79 | 53.58 | 107.2 |
| 0.0418 | 1.06 | 2.12 | 5.31 | 10.61 | 21.23 | 26.54 | 53.06 | 106.1 |
| 0.0420 | 1.05 | 2.10 | 5.26 | 10.51 | 21.02 | 26.29 | 52.56 | 105.1 |
| 0.0422 | 1.04 | 2.08 | 5.21 | 10.41 | 20.83 | 26.04 | 52.06 | 104.1 |
| 0.0424 | 1.03 | 2.06 | 5.16 | 10.32 | 20.63 | 25.79 | 51.57 | 103.2 |
| 0.0426 | 1.02 | 2.04 | 5.11 | 10.22 | 20.44 | 25.55 | 51.09 | 102.2 |
| 0.0428 | 1.01 | 2.02 | 5.06 | 10.12 | 20.25 | 25.31 | 50.61 | 101.2 |
| 0.0430 | 1.00 | 2.01 | 5.01 | 10.03 | 20.06 | 25.08 | 50.14 | 100.3 |
| 0.0432 | — | 1.99 | 4.97 | 9.94 | 19.87 | 24.85 | 49.68 | 99.37 |
| 0.0434 | — | 1.97 | 4.92 | 9.85 | 19.69 | 24.62 | 49.22 | 98.46 |
| 0.0436 | — | 1.95 | 4.88 | 9.76 | 19.51 | 24.39 | 48.77 | 97.56 |
| 0.0438 | — | 1.93 | 4.83 | 9.67 | 19.33 | 24.17 | 48.33 | 96.67 |
| 0.0440 | — | 1.92 | 4.79 | 9.58 | 19.16 | 23.95 | 47.89 | 95.79 |
| 0.0442 | — | 1.90 | 4.75 | 9.49 | 18.98 | 23.73 | 47.46 | 94.93 |
| 0.0444 | — | 1.88 | 4.70 | 9.41 | 18.81 | 23.52 | 47.03 | 94.07 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0446 | — | 1.86 | 4.66 | 9.32 | 18.64 | 23.31 | 46.61 | 93.23 |
| 0.0448 | — | 1.85 | 4.62 | 9.24 | 18.48 | 23.10 | 46.20 | 92.40 |
| 0.0450 | — | 1.83 | 4.58 | 9.16 | 18.31 | 22.90 | 45.79 | 91.58 |
| 0.0452 | — | 1.82 | 4.54 | 9.08 | 18.15 | 22.70 | 45.38 | 90.77 |
| 0.0454 | — | 1.80 | 4.50 | 9.00 | 17.99 | 22.50 | 44.98 | 89.97 |
| 0.0456 | — | 1.78 | 4.46 | 8.92 | 17.84 | 22.30 | 44.59 | 89.19 |
| 0.0458 | — | 1.77 | 4.42 | 8.84 | 17.68 | 22.10 | 44.20 | 88.41 |
| 0.0460 | — | 1.75 | 4.38 | 8.76 | 17.53 | 21.91 | 43.82 | 87.64 |
| 0.0462 | — | 1.74 | 4.34 | 8.69 | 17.38 | 21.72 | 43.44 | 86.88 |
| 0.0464 | — | 1.72 | 4.31 | 8.61 | 17.23 | 21.54 | 43.06 | 86.14 |
| 0.0466 | — | 1.71 | 4.27 | 8.54 | 17.08 | 21.35 | 42.70 | 85.40 |
| 0.0468 | — | 1.69 | 4.23 | 8.47 | 16.93 | 21.17 | 42.33 | 84.67 |
| 0.0470 | — | 1.68 | 4.20 | 8.40 | 16.79 | 20.99 | 41.97 | 83.95 |
| 0.0472 | — | 1.66 | 4.16 | 8.32 | 16.65 | 20.81 | 41.62 | 83.24 |
| 0.0474 | — | 1.65 | 4.13 | 8.25 | 16.51 | 20.64 | 41.27 | 82.54 |
| 0.0476 | — | 1.64 | 4.09 | 8.18 | 16.37 | 20.46 | 40.92 | 81.85 |
| 0.0478 | — | 1.62 | 4.06 | 8.12 | 16.23 | 20.29 | 40.58 | 81.17 |
| 0.0480 | — | 1.61 | 4.02 | 8.05 | 16.10 | 20.12 | 40.24 | 80.49 |
| 0.0482 | — | 1.60 | 3.99 | 7.98 | 15.96 | 19.96 | 39.91 | 79.82 |
| 0.0484 | — | 1.58 | 3.96 | 7.92 | 15.83 | 19.79 | 39.58 | 79.17 |
| 0.0486 | — | 1.57 | 3.93 | 7.85 | 15.70 | 19.63 | 39.25 | 78.52 |
| 0.0488 | — | 1.56 | 3.89 | 7.79 | 15.57 | 19.47 | 38.93 | 77.87 |
| 0.0490 | — | 1.54 | 3.86 | 7.72 | 15.45 | 19.31 | 38.62 | 77.24 |
| 0.0492 | — | 1.53 | 3.83 | 7.66 | 15.32 | 19.15 | 38.30 | 76.61 |
| 0.0494 | — | 1.52 | 3.80 | 7.60 | 15.20 | 19.00 | 37.99 | 75.99 |
| 0.0496 | — | 1.51 | 3.77 | 7.54 | 15.07 | 18.85 | 37.69 | 75.38 |
| 0.0498 | — | 1.50 | 3.74 | 7.48 | 14.95 | 18.70 | 37.38 | 74.78 |
| 0.0500 | — | 1.48 | 3.71 | 7.42 | 14.83 | 18.55 | 37.09 | 74.18 |
| 0.0502 | — | 1.47 | 3.68 | 7.36 | 14.72 | 18.40 | 36.79 | 73.59 |
| 0.0504 | — | 1.46 | 3.65 | 7.30 | 14.60 | 18.25 | 36.50 | 73.01 |
| 0.0506 | — | 1.45 | 3.62 | 7.24 | 14.48 | 18.11 | 36.21 | 72.43 |
| 0.0508 | — | 1.44 | 3.59 | 7.19 | 14.37 | 17.97 | 35.93 | 71.86 |
| 0.0510 | — | 1.43 | 3.56 | 7.13 | 14.26 | 17.83 | 35.65 | 71.30 |
| 0.0512 | — | 1.41 | 3.54 | 7.07 | 14.15 | 17.69 | 35.37 | 70.74 |
| 0.0514 | — | 1.40 | 3.51 | 7.02 | 14.04 | 17.55 | 35.09 | 70.19 |
| 0.0516 | — | 1.39 | 3.48 | 6.97 | 13.93 | 17.41 | 34.82 | 69.65 |
| 0.0518 | — | 1.38 | 3.46 | 6.91 | 13.82 | 17.28 | 34.55 | 69.11 |
| 0.0520 | — | 1.37 | 3.43 | 6.86 | 13.72 | 17.15 | 34.29 | 68.58 |
| 0.0522 | — | 1.36 | 3.40 | 6.81 | 13.61 | 17.02 | 34.03 | 68.06 |
| 0.0524 | — | 1.35 | 3.38 | 6.75 | 13.51 | 16.89 | 33.77 | 67.54 |
| 0.0526 | — | 1.34 | 3.35 | 6.70 | 13.40 | 16.76 | 33.51 | 67.03 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0528 | — | 1.33 | 3.33 | 6.65 | 13.30 | 16.63 | 33.26 | 66.52 |
| 0.0530 | — | 1.32 | 3.30 | 6.60 | 13.20 | 16.51 | 33.01 | 66.02 |
| 0.0532 | — | 1.31 | 3.28 | 6.55 | 13.10 | 16.38 | 32.76 | 65.52 |
| 0.0534 | — | 1.30 | 3.25 | 6.50 | 13.01 | 16.26 | 32.51 | 65.03 |
| 0.0536 | — | 1.29 | 3.23 | 6.46 | 12.91 | 16.14 | 32.27 | 64.55 |
| 0.0538 | — | 1.28 | 3.20 | 6.41 | 12.81 | 16.02 | 32.03 | 64.07 |
| 0.0540 | — | 1.27 | 3.18 | 6.36 | 12.72 | 15.90 | 31.80 | 63.60 |
| 0.0542 | — | 1.26 | 3.16 | 6.31 | 12.62 | 15.78 | 31.56 | 63.13 |
| 0.0544 | — | 1.25 | 3.13 | 6.27 | 12.53 | 15.67 | 31.33 | 62.67 |
| 0.0546 | — | 1.24 | 3.11 | 6.22 | 12.44 | 15.55 | 31.10 | 62.21 |
| 0.0548 | — | 1.23 | 3.09 | 6.18 | 12.35 | 15.44 | 30.87 | 61.75 |
| 0.0550 | — | 1.23 | 3.06 | 6.13 | 12.26 | 15.33 | 30.65 | 61.31 |
| 0.0552 | — | 1.22 | 3.04 | 6.09 | 12.17 | 15.22 | 30.43 | 60.86 |
| 0.0554 | — | 1.21 | 3.02 | 6.04 | 12.08 | 15.11 | 30.21 | 60.42 |
| 0.0556 | — | 1.20 | 3.00 | 6.00 | 12.00 | 15.00 | 29.99 | 59.99 |
| 0.0558 | — | 1.19 | 2.98 | 5.96 | 11.91 | 14.89 | 29.78 | 59.56 |
| 0.0560 | — | 1.18 | 2.96 | 5.91 | 11.83 | 14.79 | 29.56 | 59.14 |
| 0.0562 | — | 1.17 | 2.94 | 5.87 | 11.74 | 14.68 | 29.35 | 58.72 |
| 0.0564 | — | 1.17 | 2.91 | 5.83 | 11.66 | 14.58 | 29.15 | 58.30 |
| 0.0566 | — | 1.16 | 2.89 | 5.79 | 11.58 | 14.47 | 28.94 | 57.89 |
| 0.0568 | — | 1.15 | 2.87 | 5.75 | 11.50 | 14.37 | 28.74 | 57.48 |
| 0.0570 | — | 1.14 | 2.85 | 5.71 | 11.41 | 14.27 | 28.54 | 57.08 |
| 0.0572 | — | 1.13 | 2.83 | 5.67 | 11.33 | 14.17 | 28.34 | 56.68 |
| 0.0574 | — | 1.13 | 2.81 | 5.63 | 11.26 | 14.07 | 28.14 | 56.29 |
| 0.0576 | — | 1.12 | 2.79 | 5.59 | 11.18 | 13.98 | 27.95 | 55.90 |
| 0.0578 | — | 1.11 | 2.78 | 5.55 | 11.10 | 13.88 | 27.75 | 55.51 |
| 0.0580 | — | 1.10 | 2.76 | 5.51 | 11.02 | 13.78 | 27.56 | 55.13 |
| 0.0582 | — | 1.09 | 2.74 | 5.47 | 10.95 | 13.69 | 27.37 | 54.75 |
| 0.0584 | — | 1.09 | 2.72 | 5.44 | 10.87 | 13.60 | 27.18 | 54.38 |
| 0.0586 | — | 1.08 | 2.70 | 5.40 | 10.80 | 13.50 | 27.00 | 54.00 |
| 0.0588 | — | 1.07 | 2.68 | 5.36 | 10.73 | 13.41 | 26.82 | 53.64 |
| 0.0590 | — | 1.07 | 2.66 | 5.33 | 10.65 | 13.32 | 26.63 | 53.28 |
| 0.0592 | — | 1.06 | 2.65 | 5.29 | 10.58 | 13.23 | 26.46 | 52.92 |
| 0.0594 | — | 1.05 | 2.63 | 5.26 | 10.51 | 13.14 | 26.28 | 52.56 |
| 0.0596 | — | 1.04 | 2.61 | 5.22 | 10.44 | 13.05 | 26.10 | 52.21 |
| 0.0598 | — | 1.04 | 2.59 | 5.19 | 10.37 | 12.97 | 25.93 | 51.86 |
| 0.0600 | — | 1.03 | 2.58 | 5.15 | 10.30 | 12.88 | 25.75 | 51.51 |
| 0.0602 | — | 1.02 | 2.56 | 5.12 | 10.23 | 12.79 | 25.58 | 51.17 |
| 0.0604 | — | 1.02 | 2.54 | 5.08 | 10.17 | 12.71 | 25.41 | 50.83 |
| 0.0606 | — | 1.01 | 2.52 | 5.05 | 10.10 | 12.63 | 25.25 | 50.50 |
| 0.0608 | — | 1.00 | 2.51 | 5.02 | 10.03 | 12.54 | 25.08 | 50.17 |
| 0.0610 | — | — | 2.49 | 4.98 | 9.97 | 12.46 | 24.92 | 49.84 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0612 | — | — | 2.48 | 4.95 | 9.90 | 12.38 | 24.75 | 49.51 |
| 0.0614 | — | — | 2.46 | 4.92 | 9.84 | 12.30 | 24.59 | 49.19 |
| 0.0616 | — | — | 2.44 | 4.89 | 9.77 | 12.22 | 24.43 | 48.87 |
| 0.0618 | — | — | 2.43 | 4.86 | 9.71 | 12.14 | 24.28 | 48.56 |
| 0.0620 | — | — | 2.41 | 4.82 | 9.65 | 12.06 | 24.12 | 48.24 |
| 0.0622 | — | — | 2.40 | 4.79 | 9.59 | 11.98 | 23.96 | 47.93 |
| 0.0624 | — | — | 2.38 | 4.76 | 9.52 | 11.91 | 23.81 | 47.63 |
| 0.0626 | — | — | 2.37 | 4.73 | 9.46 | 11.73 | 23.66 | 47.32 |
| 0.0628 | — | — | 2.35 | 4.70 | 9.40 | 11.76 | 23.51 | 47.02 |
| 0.0630 | — | — | 2.34 | 4.67 | 9.34 | 11.68 | 23.36 | 46.72 |
| 0.0632 | — | — | 2.32 | 4.64 | 9.28 | 11.61 | 23.21 | 46.43 |
| 0.0634 | — | — | 2.31 | 4.61 | 9.23 | 11.54 | 23.07 | 46.14 |
| 0.0636 | — | — | 2.29 | 4.58 | 9.17 | 11.46 | 22.92 | 45.85 |
| 0.0638 | — | — | 2.28 | 4.56 | 9.11 | 11.39 | 22.78 | 45.56 |
| 0.0640 | — | — | 2.26 | 4.53 | 9.05 | 11.32 | 22.64 | 45.28 |
| 0.0642 | — | — | 2.25 | 4.50 | 9.00 | 11.25 | 22.49 | 44.99 |
| 0.0644 | — | — | 2.24 | 4.47 | 8.94 | 11.18 | 22.36 | 44.72 |
| 0.0646 | — | — | 2.22 | 4.44 | 8.89 | 11.11 | 22.22 | 44.44 |
| 0.0648 | — | — | 2.21 | 4.42 | 8.83 | 11.04 | 22.08 | 44.16 |
| 0.0650 | — | — | 2.19 | 4.39 | 8.78 | 10.97 | 21.94 | 43.89 |
| 0.0652 | — | — | 2.18 | 4.36 | 8.72 | 10.91 | 21.81 | 43.62 |
| 0.0654 | — | — | 2.17 | 4.34 | 8.67 | 10.84 | 21.68 | 43.36 |
| 0.0656 | — | — | 2.15 | 4.31 | 8.62 | 10.77 | 21.54 | 43.09 |
| 0.0658 | — | — | 2.14 | 4.28 | 8.57 | 10.71 | 21.41 | 42.83 |
| 0.0660 | — | — | 2.13 | 4.26 | 8.51 | 10.64 | 21.28 | 42.57 |
| 0.0662 | — | — | 2.12 | 4.23 | 8.46 | 10.58 | 21.16 | 42.32 |
| 0.0664 | — | — | 2.10 | 4.21 | 8.41 | 10.52 | 21.03 | 42.06 |
| 0.0666 | — | — | 2.09 | 4.18 | 8.36 | 10.45 | 20.90 | 41.81 |
| 0.0668 | — | — | 2.08 | 4.16 | 8.31 | 10.39 | 20.78 | 41.56 |
| 0.0670 | — | — | 2.07 | 4.13 | 8.26 | 10.33 | 20.65 | 41.31 |
| 0.0672 | — | — | 2.05 | 4.11 | 8.21 | 10.27 | 20.53 | 41.07 |
| 0.0674 | — | — | 2.04 | 4.08 | 8.16 | 10.21 | 20.41 | 40.82 |
| 0.0676 | — | — | 2.03 | 4.06 | 8.12 | 10.15 | 20.29 | 40.58 |
| 0.0678 | — | — | 2.02 | 4.03 | 8.07 | 10.09 | 20.17 | 40.34 |
| 0.0680 | — | — | 2.01 | 4.01 | 8.02 | 10.03 | 20.05 | 40.11 |
| 0.0682 | — | — | 1.99 | 3.99 | 7.97 | 9.97 | 19.93 | 39.87 |
| 0.0684 | — | — | 1.98 | 3.96 | 7.93 | 9.91 | 19.82 | 39.64 |
| 0.0686 | — | — | 1.97 | 3.94 | 7.88 | 9.85 | 19.70 | 39.41 |
| 0.0688 | — | — | 1.96 | 3.92 | 7.83 | 9.80 | 19.59 | 39.18 |
| 0.0690 | — | — | 1.95 | 3.90 | 7.79 | 9.74 | 19.47 | 38.95 |
| 0.0692 | — | — | 1.94 | 3.87 | 7.74 | 9.68 | 19.36 | 38.73 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0694 | — | — | 1.93 | 3.85 | 7.70 | 9.63 | 19.25 | 38.50 |
| 0.0696 | — | — | 1.91 | 3.83 | 7.66 | 9.57 | 19.14 | 38.28 |
| 0.0698 | — | — | 1.90 | 3.81 | 7.61 | 9.52 | 19.03 | 38.06 |
| 0.0700 | — | — | 1.89 | 3.78 | 7.57 | 9.46 | 18.92 | 37.85 |
| 0.0702 | — | — | 1.88 | 3.76 | 7.53 | 9.41 | 18.81 | 37.63 |
| 0.0704 | — | — | 1.87 | 3.74 | 7.48 | 9.36 | 18.71 | 37.42 |
| 0.0706 | — | — | 1.86 | 3.72 | 7.44 | 9.30 | 18.60 | 37.21 |
| 0.0708 | — | — | 1.85 | 3.70 | 7.40 | 9.25 | 18.50 | 37.00 |
| 0.0710 | — | — | 1.84 | 3.68 | 7.36 | 9.20 | 18.39 | 36.79 |
| 0.0712 | — | — | 1.83 | 3.66 | 7.32 | 9.15 | 18.29 | 36.58 |
| 0.0714 | — | — | 1.82 | 3.64 | 7.27 | 9.10 | 18.19 | 36.38 |
| 0.0716 | — | — | 1.81 | 3.62 | 7.23 | 9.04 | 18.09 | 36.17 |
| 0.0718 | — | — | 1.80 | 3.60 | 7.19 | 8.99 | 17.98 | 35.97 |
| 0.0720 | — | — | 1.79 | 3.58 | 7.15 | 8.94 | 17.88 | 35.77 |
| 0.0722 | — | — | 1.78 | 3.56 | 7.11 | 8.89 | 17.79 | 35.58 |
| 0.0724 | — | — | 1.77 | 3.54 | 7.08 | 8.85 | 17.69 | 35.38 |
| 0.0726 | — | — | 1.76 | 3.52 | 7.04 | 8.80 | 17.59 | 35.18 |
| 0.0728 | — | — | 1.75 | 3.50 | 7.00 | 8.75 | 17.49 | 34.99 |
| 0.0730 | — | — | 1.74 | 3.48 | 6.96 | 8.70 | 17.40 | 34.80 |
| 0.0732 | — | — | 1.73 | 3.46 | 6.92 | 8.65 | 17.30 | 34.61 |
| 0.0734 | — | — | 1.72 | 3.44 | 6.88 | 8.61 | 17.21 | 34.42 |
| 0.0736 | — | — | 1.71 | 3.42 | 6.85 | 8.56 | 17.12 | 34.24 |
| 0.0738 | — | — | 1.70 | 3.40 | 6.81 | 8.51 | 17.02 | 34.05 |
| 0.0740 | — | — | 1.69 | 3.39 | 6.77 | 8.47 | 16.93 | 33.87 |
| 0.0742 | — | — | 1.68 | 3.37 | 6.74 | 8.42 | 16.84 | 33.68 |
| 0.0744 | — | — | 1.67 | 3.35 | 6.70 | 8.38 | 16.75 | 33.50 |
| 0.0746 | — | — | 1.67 | 3.33 | 6.66 | 8.33 | 16.66 | 33.32 |
| 0.0748 | — | — | 1.66 | 3.31 | 6.63 | 8.29 | 16.57 | 33.15 |
| 0.0750 | — | — | 1.65 | 3.30 | 6.59 | 8.24 | 16.48 | 32.97 |
| 0.0752 | — | — | 1.64 | 3.28 | 6.56 | 8.20 | 16.40 | 32.79 |
| 0.0754 | — | — | 1.63 | 3.26 | 6.52 | 8.16 | 16.31 | 32.62 |
| 0.0756 | — | — | 1.62 | 3.24 | 6.49 | 8.11 | 16.22 | 32.45 |
| 0.0758 | — | — | 1.61 | 3.23 | 6.45 | 8.07 | 16.14 | 32.28 |
| 0.0760 | — | — | 1.61 | 3.21 | 6.42 | 8.03 | 16.05 | 32.11 |
| 0.0762 | — | — | 1.60 | 3.19 | 6.39 | 7.99 | 15.97 | 31.94 |
| 0.0764 | — | — | 1.59 | 3.18 | 6.35 | 7.94 | 15.88 | 31.77 |
| 0.0766 | — | — | 1.58 | 3.16 | 6.32 | 7.90 | 15.80 | 31.61 |
| 0.0768 | — | — | 1.57 | 3.14 | 6.29 | 7.86 | 15.72 | 31.44 |
| 0.0770 | — | — | 1.56 | 3.13 | 6.26 | 7.82 | 15.64 | 31.28 |
| 0.0772 | — | — | 1.56 | 3.11 | 6.22 | 7.78 | 15.56 | 31.12 |
| 0.0774 | — | — | 1.55 | 3.10 | 6.19 | 7.74 | 15.48 | 30.96 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0776 | — | — | 1.54 | 3.08 | 6.16 | 7.70 | 15.40 | 30.80 |
| 0.0778 | — | — | 1.53 | 3.06 | 6.13 | 7.66 | 15.32 | 30.64 |
| 0.0780 | — | — | 1.52 | 3.05 | 6.10 | 7.62 | 15.24 | 30.48 |
| 0.0782 | — | — | 1.52 | 3.03 | 6.06 | 7.58 | 15.16 | 30.33 |
| 0.0784 | — | — | 1.51 | 3.02 | 6.03 | 7.54 | 15.08 | 30.17 |
| 0.0786 | — | — | 1.50 | 3.00 | 6.00 | 7.51 | 15.01 | 30.02 |
| 0.0788 | — | — | 1.49 | 2.99 | 5.97 | 7.47 | 14.93 | 29.87 |
| 0.0790 | — | — | 1.49 | 2.97 | 5.94 | 7.43 | 14.86 | 29.71 |
| 0.0792 | — | — | 1.48 | 2.96 | 5.91 | 7.39 | 14.78 | 29.56 |
| 0.0794 | — | — | 1.47 | 2.94 | 5.88 | 7.35 | 14.71 | 29.42 |
| 0.0796 | — | — | 1.46 | 2.93 | 5.85 | 7.32 | 14.63 | 29.27 |
| 0.0798 | — | — | 1.46 | 2.91 | 5.82 | 7.28 | 14.56 | 29.12 |
| 0.0800 | — | — | 1.45 | 2.90 | 5.79 | 7.24 | 14.49 | 28.98 |
| 0.0802 | — | — | 1.44 | 2.88 | 5.77 | 7.21 | 14.41 | 28.83 |
| 0.0804 | — | — | 1.43 | 2.87 | 5.74 | 7.17 | 14.34 | 28.69 |
| 0.0806 | — | — | 1.43 | 2.85 | 5.71 | 7.14 | 14.27 | 28.55 |
| 0.0808 | — | — | 1.42 | 2.84 | 5.68 | 7.10 | 14.20 | 28.41 |
| 0.0810 | — | — | 1.41 | 2.83 | 5.65 | 7.07 | 14.13 | 28.27 |
| 0.0812 | — | — | 1.41 | 2.81 | 5.62 | 7.03 | 14.06 | 28.13 |
| 0.0814 | — | — | 1.40 | 2.80 | 5.60 | 7.00 | 13.99 | 27.99 |
| 0.0816 | — | — | 1.39 | 2.79 | 5.57 | 6.96 | 13.92 | 27.85 |
| 0.0818 | — | — | 1.39 | 2.77 | 5.54 | 6.93 | 13.86 | 27.72 |
| 0.0820 | — | — | 1.38 | 2.76 | 5.52 | 6.90 | 13.79 | 27.58 |
| 0.0822 | — | — | 1.37 | 2.74 | 5.49 | 6.86 | 13.72 | 27.45 |
| 0.0824 | — | — | 1.37 | 2.73 | 5.46 | 6.83 | 13.66 | 27.31 |
| 0.0826 | — | — | 1.36 | 2.72 | 5.44 | 6.80 | 13.59 | 27.18 |
| 0.0828 | — | — | 1.35 | 2.70 | 5.41 | 6.76 | 13.52 | 27.05 |
| 0.0830 | — | — | 1.35 | 2.69 | 5.38 | 6.73 | 13.46 | 26.92 |
| 0.0832 | — | — | 1.34 | 2.68 | 5.36 | 6.70 | 13.39 | 26.79 |
| 0.0834 | — | — | 1.33 | 2.67 | 5.33 | 6.67 | 13.33 | 26.66 |
| 0.0836 | — | — | 1.33 | 2.65 | 5.31 | 6.63 | 13.27 | 26.53 |
| 0.0838 | — | — | 1.32 | 2.64 | 5.28 | 6.60 | 13.20 | 26.41 |
| 0.0840 | — | — | 1.31 | 2.63 | 5.26 | 6.57 | 13.14 | 26.28 |
| 0.0842 | — | — | 1.31 | 2.62 | 5.23 | 6.54 | 13.08 | 26.16 |
| 0.0844 | — | — | 1.30 | 2.60 | 5.21 | 6.51 | 13.02 | 26.03 |
| 0.0846 | — | — | 1.30 | 2.59 | 5.18 | 6.48 | 12.95 | 25.91 |
| 0.0848 | — | — | 1.29 | 2.58 | 5.16 | 6.45 | 12.89 | 25.79 |
| 0.0850 | — | — | 1.28 | 2.57 | 5.13 | 6.42 | 12.83 | 25.67 |
| 0.0852 | — | — | 1.28 | 2.55 | 5.11 | 6.39 | 12.77 | 25.55 |
| 0.0854 | — | — | 1.27 | 2.54 | 5.09 | 6.36 | 12.71 | 25.43 |
| 0.0856 | — | — | 1.27 | 2.53 | 5.06 | 6.33 | 12.65 | 25.31 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0858 | — | — | 1.26 | 2.52 | 5.04 | 6.30 | 12.59 | 25.19 |
| 0.0860 | — | — | 1.25 | 2.51 | 5.01 | 6.27 | 12.54 | 25.07 |
| 0.0862 | — | — | 1.25 | 2.50 | 4.99 | 6.24 | 12.48 | 24.96 |
| 0.0864 | — | — | 1.24 | 2.48 | 4.97 | 6.21 | 12.42 | 24.84 |
| 0.0866 | — | — | 1.24 | 2.47 | 4.95 | 6.18 | 12.36 | 24.73 |
| 0.0868 | — | — | 1.23 | 2.46 | 4.92 | 6.15 | 12.31 | 24.61 |
| 0.0870 | — | — | 1.22 | 2.45 | 4.90 | 6.13 | 12.25 | 24.50 |
| 0.0872 | — | — | 1.22 | 2.44 | 4.88 | 6.10 | 12.19 | 24.39 |
| 0.0874 | — | — | 1.21 | 2.43 | 4.86 | 6.07 | 12.14 | 24.28 |
| 0.0876 | — | — | 1.21 | 2.42 | 4.83 | 6.04 | 12.08 | 24.17 |
| 0.0878 | — | — | 1.20 | 2.41 | 4.81 | 6.01 | 12.03 | 24.06 |
| 0.0880 | — | — | 1.20 | 2.39 | 4.79 | 5.99 | 11.97 | 23.95 |
| 0.0882 | — | — | 1.19 | 2.38 | 4.77 | 5.96 | 11.92 | 23.84 |
| 0.0884 | — | — | 1.19 | 2.37 | 4.75 | 5.93 | 11.86 | 23.73 |
| 0.0886 | — | — | 1.18 | 2.36 | 4.72 | 5.91 | 11.81 | 23.62 |
| 0.0888 | — | — | 1.18 | 2.35 | 4.70 | 5.88 | 11.76 | 23.52 |
| 0.0890 | — | — | 1.17 | 2.34 | 4.68 | 5.85 | 11.71 | 23.41 |
| 0.0892 | — | — | 1.17 | 2.33 | 4.66 | 5.83 | 11.65 | 23.31 |
| 0.0894 | — | — | 1.16 | 2.32 | 4.64 | 5.80 | 11.60 | 23.20 |
| 0.0896 | — | — | 1.15 | 2.31 | 4.62 | 5.78 | 11.55 | 23.10 |
| 0.0898 | — | — | 1.15 | 2.30 | 4.60 | 5.75 | 11.50 | 23.00 |
| 0.0900 | — | — | 1.14 | 2.29 | 4.58 | 5.72 | 11.45 | 22.90 |
| 0.0902 | — | — | 1.14 | 2.28 | 4.56 | 5.70 | 11.40 | 22.79 |
| 0.0904 | — | — | 1.13 | 2.27 | 4.54 | 5.67 | 11.35 | 22.69 |
| 0.0906 | — | — | 1.13 | 2.26 | 4.52 | 5.65 | 11.30 | 22.59 |
| 0.0908 | — | — | 1.12 | 2.25 | 4.50 | 5.62 | 11.25 | 22.49 |
| 0.0910 | — | — | 1.12 | 2.24 | 4.48 | 5.60 | 11.20 | 22.39 |
| 0.0912 | — | — | 1.11 | 2.23 | 4.46 | 5.57 | 11.15 | 22.30 |
| 0.0914 | — | — | 1.11 | 2.22 | 4.44 | 5.55 | 11.10 | 22.20 |
| 0.0916 | — | — | 1.11 | 2.21 | 4.42 | 5.53 | 11.05 | 22.10 |
| 0.0918 | — | — | 1.10 | 2.20 | 4.40 | 5.50 | 11.00 | 22.01 |
| 0.0920 | — | — | 1.10 | 2.19 | 4.38 | 5.48 | 10.95 | 21.91 |
| 0.0922 | — | — | 1.09 | 2.18 | 4.36 | 5.45 | 10.91 | 21.82 |
| 0.0924 | — | — | 1.09 | 2.17 | 4.34 | 5.43 | 10.86 | 21.72 |
| 0.0926 | — | — | 1.08 | 2.16 | 4.33 | 5.41 | 10.81 | 21.63 |
| 0.0928 | — | — | 1.08 | 2.15 | 4.31 | 5.38 | 10.77 | 21.53 |
| 0.0930 | — | — | 1.07 | 2.14 | 4.29 | 5.36 | 10.72 | 21.44 |
| 0.0932 | — | — | 1.07 | 2.13 | 4.27 | 5.34 | 10.67 | 21.35 |
| 0.0934 | — | — | 1.06 | 2.13 | 4.25 | 5.32 | 10.63 | 21.26 |
| 0.0936 | — | — | 1.06 | 2.12 | 4.23 | 5.29 | 10.58 | 21.17 |
| 0.0938 | — | — | 1.05 | 2.11 | 4.22 | 5.27 | 10.54 | 21.08 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.0940 | — | — | 1.05 | 2.10 | 4.20 | 5.25 | 10.49 | 20.99 |
| 0.0942 | — | — | 1.04 | 2.09 | 4.18 | 5.23 | 10.45 | 20.90 |
| 0.0944 | — | — | 1.04 | 2.08 | 4.16 | 5.20 | 10.40 | 20.81 |
| 0.0946 | — | — | 1.04 | 2.07 | 4.14 | 5.18 | 10.36 | 20.72 |
| 0.0948 | — | — | 1.03 | 2.06 | 4.13 | 5.16 | 10.32 | 20.64 |
| 0.0950 | — | — | 1.03 | 2.05 | 4.11 | 5.14 | 10.27 | 20.55 |
| 0.0952 | — | — | 1.02 | 2.05 | 4.09 | 5.12 | 10.23 | 20.46 |
| 0.0954 | — | — | 1.02 | 2.04 | 4.07 | 5.09 | 10.19 | 20.38 |
| 0.0956 | — | — | 1.01 | 2.03 | 4.06 | 5.07 | 10.14 | 20.29 |
| 0.0958 | — | — | 1.01 | 2.02 | 4.04 | 5.05 | 10.10 | 20.21 |
| 0.0960 | — | — | 1.01 | 2.01 | 4.02 | 5.03 | 10.06 | 20.12 |
| 0.0962 | — | — | 1.00 | 2.00 | 4.01 | 5.01 | 10.02 | 20.04 |
| 0.0964 | — | — | — | 2.00 | 3.99 | 4.99 | 9.98 | 19.96 |
| 0.0966 | — | — | — | 1.99 | 3.97 | 4.97 | 9.94 | 19.87 |
| 0.0968 | — | — | — | 1.98 | 3.96 | 4.95 | 9.89 | 19.79 |
| 0.0970 | — | — | — | 1.97 | 3.94 | 4.93 | 9.85 | 19.71 |
| 0.0972 | — | — | — | 1.96 | 3.93 | 4.91 | 9.81 | 19.63 |
| 0.0974 | — | — | — | 1.95 | 3.91 | 4.89 | 9.77 | 19.55 |
| 0.0976 | — | — | — | 1.95 | 3.89 | 4.87 | 9.73 | 19.47 |
| 0.0978 | — | — | — | 1.94 | 3.88 | 4.85 | 9.69 | 19.39 |
| 0.0980 | — | — | — | 1.93 | 3.86 | 4.83 | 9.65 | 19.31 |
| 0.0982 | — | — | — | 1.92 | 3.85 | 4.81 | 9.61 | 19.23 |
| 0.0984 | — | — | — | 1.92 | 3.83 | 4.79 | 9.58 | 19.15 |
| 0.0986 | — | — | — | 1.91 | 3.81 | 4.77 | 9.54 | 19.08 |
| 0.0988 | — | — | — | 1.90 | 3.80 | 4.75 | 9.50 | 19.00 |
| 0.0990 | — | — | — | 1.89 | 3.78 | 4.73 | 9.46 | 18.92 |
| 0.0992 | — | — | — | 1.88 | 3.77 | 4.71 | 9.42 | 18.85 |
| 0.0994 | — | — | — | 1.88 | 3.75 | 4.69 | 9.38 | 18.77 |
| 0.0996 | — | — | — | 1.87 | 3.74 | 4.67 | 9.35 | 18.69 |
| 0.0998 | — | — | — | 1.86 | 3.72 | 4.66 | 9.31 | 18.62 |
| 0.1000 | — | — | — | 1.85 | 3.71 | 4.64 | 9.27 | 18.55 |
| 0.1002 | — | — | — | 1.85 | 3.69 | 4.62 | 9.23 | 18.47 |
| 0.1004 | — | — | — | 1.84 | 3.68 | 4.60 | 9.20 | 18.40 |
| 0.1006 | — | — | — | 1.83 | 3.66 | 4.58 | 9.16 | 18.32 |
| 0.1008 | — | — | — | 1.83 | 3.65 | 4.56 | 9.12 | 18.25 |
| 0.1010 | — | — | — | 1.82 | 3.64 | 4.55 | 9.09 | 18.18 |
| 0.1012 | — | — | — | 1.81 | 3.62 | 4.53 | 9.05 | 18.11 |
| 0.1014 | — | — | — | 1.80 | 3.61 | 4.51 | 9.02 | 18.04 |
| 0.1016 | — | — | — | 1.80 | 3.59 | 4.49 | 8.98 | 17.97 |
| 0.1018 | — | — | — | 1.79 | 3.58 | 4.47 | 8.95 | 17.90 |
| 0.1020 | — | — | — | 1.78 | 3.56 | 4.46 | 8.91 | 17.82 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1022 | — | — | — | 1.78 | 3.55 | 4.44 | 8.88 | 17.76 |
| 0.1024 | — | — | — | 1.77 | 3.54 | 4.42 | 8.84 | 17.69 |
| 0.1026 | — | — | — | 1.76 | 3.52 | 4.40 | 8.81 | 17.62 |
| 0.1028 | — | — | — | 1.75 | 3.51 | 4.39 | 8.77 | 17.55 |
| 0.1030 | — | — | — | 1.75 | 3.50 | 4.37 | 8.74 | 17.48 |
| 0.1032 | — | — | — | 1.74 | 3.48 | 4.35 | 8.71 | 17.41 |
| 0.1034 | — | — | — | 1.73 | 3.47 | 4.34 | 8.67 | 17.35 |
| 0.1036 | — | — | — | 1.73 | 3.46 | 4.32 | 8.64 | 17.28 |
| 0.1038 | — | — | — | 1.72 | 3.44 | 4.30 | 8.61 | 17.21 |
| 0.1040 | — | — | — | 1.71 | 3.43 | 4.29 | 8.57 | 17.15 |
| 0.1042 | — | — | — | 1.71 | 3.42 | 4.27 | 8.54 | 17.08 |
| 0.1044 | — | — | — | 1.70 | 3.40 | 4.25 | 8.51 | 17.01 |
| 0.1046 | — | — | — | 1.69 | 3.39 | 4.24 | 8.47 | 16.95 |
| 0.1048 | — | — | — | 1.69 | 3.38 | 4.22 | 8.44 | 16.89 |
| 0.1050 | — | — | — | 1.68 | 3.36 | 4.21 | 8.41 | 16.82 |
| 0.1052 | — | — | — | 1.68 | 3.35 | 4.19 | 8.38 | 16.76 |
| 0.1054 | — | — | — | 1.67 | 3.34 | 4.17 | 8.35 | 16.69 |
| 0.1056 | — | — | — | 1.66 | 3.33 | 4.16 | 8.31 | 16.63 |
| 0.1058 | — | — | — | 1.66 | 3.31 | 4.14 | 8.28 | 16.57 |
| 0.1060 | — | — | — | 1.65 | 3.30 | 4.13 | 8.25 | 16.51 |
| 0.1062 | — | — | — | 1.64 | 3.29 | 4.11 | 8.22 | 16.44 |
| 0.1064 | — | — | — | 1.64 | 3.28 | 4.10 | 8.19 | 16.38 |
| 0.1066 | — | — | — | 1.63 | 3.26 | 4.08 | 8.16 | 16.32 |
| 0.1068 | — | — | — | 1.63 | 3.25 | 4.07 | 8.13 | 16.26 |
| 0.1070 | — | — | — | 1.62 | 3.24 | 4.05 | 8.10 | 16.20 |
| 0.1072 | — | — | — | 1.61 | 3.23 | 4.03 | 8.07 | 16.14 |
| 0.1074 | — | — | — | 1.61 | 3.22 | 4.02 | 8.04 | 16.08 |
| 0.1076 | — | — | — | 1.60 | 3.20 | 4.00 | 8.01 | 16.02 |
| 0.1078 | — | — | — | 1.60 | 3.19 | 3.99 | 7.98 | 15.96 |
| 0.1080 | — | — | — | 1.59 | 3.18 | 3.98 | 7.95 | 15.90 |
| 0.1082 | — | — | — | 1.58 | 3.17 | 3.96 | 7.92 | 15.84 |
| 0.1084 | — | — | — | 1.58 | 3.16 | 3.95 | 7.89 | 15.78 |
| 0.1086 | — | — | — | 1.57 | 3.14 | 3.93 | 7.86 | 15.72 |
| 0.1088 | — | — | — | 1.57 | 3.13 | 3.92 | 7.83 | 15.67 |
| 0.1090 | — | — | — | 1.56 | 3.12 | 3.90 | 7.80 | 15.61 |
| 0.1092 | — | — | — | 1.56 | 3.11 | 3.89 | 7.78 | 15.55 |
| 0.1094 | — | — | — | 1.55 | 3.10 | 3.87 | 7.75 | 15.50 |
| 0.1096 | — | — | — | 1.54 | 3.09 | 3.86 | 7.72 | 15.44 |
| 0.1098 | — | — | — | 1.54 | 3.08 | 3.85 | 7.69 | 15.38 |
| 0.1100 | — | — | — | 1.53 | 3.06 | 3.83 | 7.66 | 15.33 |
| 0.1102 | — | — | — | 1.53 | 3.05 | 3.82 | 7.63 | 15.27 |
| 0.1104 | — | — | — | 1.52 | 3.04 | 3.80 | 7.61 | 15.22 |
| 0.1106 | — | — | — | 1.52 | 3.03 | 3.79 | 7.58 | 15.16 |
| 0.1108 | — | — | — | 1.51 | 3.02 | 3.78 | 7.55 | 15.11 |
| 0.1110 | — | — | — | 1.51 | 3.01 | 3.76 | 7.53 | 15.05 |
| 0.1112 | — | — | — | 1.50 | 3.00 | 3.75 | 7.50 | 15.00 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1114 | — | — | — | 1.49 | 2.99 | 3.74 | 7.47 | 14.94 |
| 0.1116 | — | — | — | 1.49 | 2.98 | 3.72 | 7.44 | 14.89 |
| 0.1118 | — | — | — | 1.48 | 2.97 | 3.71 | 7.42 | 14.84 |
| 0.1120 | — | — | — | 1.48 | 2.96 | 3.70 | 7.39 | 14.78 |
| 0.1122 | — | — | — | 1.47 | 2.95 | 3.68 | 7.36 | 14.73 |
| 0.1124 | — | — | — | 1.47 | 2.94 | 3.67 | 7.34 | 14.68 |
| 0.1126 | — | — | — | 1.46 | 2.93 | 3.66 | 7.31 | 14.63 |
| 0.1128 | — | — | — | 1.46 | 2.91 | 3.64 | 7.29 | 14.58 |
| 0.1130 | — | — | — | 1.45 | 2.90 | 3.63 | 7.26 | 14.52 |
| 0.1132 | — | — | — | 1.45 | 2.89 | 3.62 | 7.24 | 14.47 |
| 0.1134 | — | — | — | 1.44 | 2.88 | 3.61 | 7.21 | 14.42 |
| 0.1136 | — | — | — | 1.44 | 2.87 | 3.59 | 7.18 | 14.37 |
| 0.1138 | — | — | — | 1.43 | 2.86 | 3.58 | 7.16 | 14.32 |
| 0.1140 | — | — | — | 1.43 | 2.85 | 3.57 | 7.13 | 14.27 |
| 0.1142 | — | — | — | 1.42 | 2.84 | 3.56 | 7.11 | 14.22 |
| 0.1144 | — | — | — | 1.42 | 2.83 | 3.54 | 7.08 | 14.17 |
| 0.1146 | — | — | — | 1.41 | 2.82 | 3.53 | 7.06 | 14.12 |
| 0.1148 | — | — | — | 1.41 | 2.81 | 3.52 | 7.04 | 14.07 |
| 0.1150 | — | — | — | 1.40 | 2.80 | 3.51 | 7.01 | 14.02 |
| 0.1152 | — | — | — | 1.40 | 2.79 | 3.49 | 6.99 | 13.97 |
| 0.1154 | — | — | — | 1.39 | 2.78 | 3.48 | 6.96 | 13.93 |
| 0.1156 | — | — | — | 1.39 | 2.78 | 3.47 | 6.94 | 13.88 |
| 0.1158 | — | — | — | 1.38 | 2.77 | 3.46 | 6.91 | 13.83 |
| 0.1160 | — | — | — | 1.38 | 2.76 | 3.45 | 6.89 | 13.78 |
| 0.1162 | — | — | — | 1.37 | 2.75 | 3.43 | 6.87 | 13.73 |
| 0.1164 | — | — | — | 1.37 | 2.74 | 3.42 | 6.84 | 13.69 |
| 0.1166 | — | — | — | 1.36 | 2.73 | 3.41 | 6.82 | 13.64 |
| 0.1168 | — | — | — | 1.36 | 2.72 | 3.40 | 6.80 | 13.59 |
| 0.1170 | — | — | — | 1.35 | 2.71 | 3.39 | 6.77 | 13.55 |
| 0.1172 | — | — | — | 1.35 | 2.70 | 3.38 | 6.75 | 13.50 |
| 0.1174 | — | — | — | 1.35 | 2.69 | 3.36 | 6.73 | 13.46 |
| 0.1176 | — | — | — | 1.34 | 2.68 | 3.35 | 6.70 | 13.41 |
| 0.1178 | — | — | — | 1.34 | 2.67 | 3.34 | 6.68 | 13.36 |
| 0.1180 | — | — | — | 1.33 | 2.66 | 3.33 | 6.66 | 13.32 |
| 0.1182 | — | — | — | 1.33 | 2.65 | 3.32 | 6.64 | 13.27 |
| 0.1184 | — | — | — | 1.32 | 2.65 | 3.31 | 6.61 | 13.23 |
| 0.1186 | — | — | — | 1.32 | 2.64 | 3.30 | 6.59 | 13.18 |
| 0.1188 | — | — | — | 1.31 | 2.63 | 3.29 | 6.57 | 13.14 |
| 0.1190 | — | — | — | 1.31 | 2.62 | 3.27 | 6.55 | 13.10 |
| 0.1192 | — | — | — | 1.31 | 2.61 | 3.26 | 6.53 | 13.05 |
| 0.1194 | — | — | — | 1.30 | 2.60 | 3.25 | 6.50 | 13.01 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1196 | — | — | — | 1.30 | 2.59 | 3.24 | 6.48 | 12.96 |
| 0.1198 | — | — | — | 1.29 | 2.58 | 3.23 | 6.46 | 12.92 |
| 0.1120 | — | — | — | 1.29 | 2.58 | 3.22 | 6.44 | 12.88 |
| 0.1202 | — | — | — | 1.28 | 2.57 | 3.21 | 6.42 | 12.84 |
| 0.1204 | — | — | — | 1.28 | 2.56 | 3.20 | 6.40 | 12.79 |
| 0.1206 | — | — | — | 1.28 | 2.55 | 3.19 | 6.37 | 12.75 |
| 0.1208 | — | — | — | 1.27 | 2.54 | 3.18 | 6.35 | 12.71 |
| 0.1210 | — | — | — | 1.27 | 2.53 | 3.17 | 6.33 | 12.67 |
| 0.1212 | — | — | — | 1.26 | 2.52 | 3.16 | 6.31 | 12.62 |
| 0.1214 | — | — | — | 1.26 | 2.52 | 3.15 | 6.29 | 12.58 |
| 0.1216 | — | — | — | 1.25 | 2.51 | 3.14 | 6.27 | 12.54 |
| 0.1218 | — | — | — | 1.25 | 2.50 | 3.13 | 6.25 | 12.50 |
| 0.1220 | — | — | — | 1.25 | 2.49 | 3.12 | 6.23 | 12.46 |
| 0.1222 | — | — | — | 1.24 | 2.48 | 3.11 | 6.21 | 12.42 |
| 0.1224 | — | — | — | 1.24 | 2.48 | 3.09 | 6.19 | 12.38 |
| 0.1226 | — | — | — | 1.23 | 2.47 | 3.08 | 6.17 | 12.34 |
| 0.1228 | — | — | — | 1.23 | 2.46 | 3.07 | 6.15 | 12.30 |
| 0.1230 | — | — | — | 1.23 | 2.45 | 3.06 | 6.13 | 12.26 |
| 0.1232 | — | — | — | 1.22 | 2.44 | 3.05 | 6.11 | 12.22 |
| 0.1234 | — | — | — | 1.22 | 2.44 | 3.04 | 6.09 | 12.18 |
| 0.1236 | — | — | — | 1.21 | 2.43 | 3.04 | 6.07 | 12.14 |
| 0.1238 | — | — | — | 1.21 | 2.42 | 3.03 | 6.05 | 12.10 |
| 0.1240 | — | — | — | 1.21 | 2.41 | 3.02 | 6.03 | 12.06 |
| 0.1242 | — | — | — | 1.20 | 2.40 | 3.01 | 6.01 | 12.02 |
| 0.1244 | — | — | — | 1.20 | 2.40 | 3.00 | 5.99 | 11.98 |
| 0.1246 | — | — | — | 1.19 | 2.39 | 2.99 | 5.97 | 11.95 |
| 0.1248 | — | — | — | 1.19 | 2.38 | 2.98 | 5.95 | 11.91 |
| 0.1250 | — | — | — | 1.19 | 2.37 | 2.97 | 5.93 | 11.87 |
| 0.1252 | — | — | — | 1.18 | 2.37 | 2.96 | 5.91 | 11.83 |
| 0.1254 | — | — | — | 1.18 | 2.36 | 2.95 | 5.90 | 11.79 |
| 0.1256 | — | — | — | 1.18 | 2.35 | 2.94 | 5.88 | 11.76 |
| 0.1258 | — | — | — | 1.17 | 2.34 | 2.93 | 5.86 | 11.72 |
| 0.1260 | — | — | — | 1.17 | 2.34 | 2.92 | 5.84 | 11.68 |
| 0.1262 | — | — | — | 1.16 | 2.33 | 2.91 | 5.82 | 11.64 |
| 0.1264 | — | — | — | 1.16 | 2.32 | 2.90 | 5.80 | 11.61 |
| 0.1266 | — | — | — | 1.16 | 2.31 | 2.89 | 5.78 | 11.57 |
| 0.1268 | — | — | — | 1.15 | 2.31 | 2.88 | 5.77 | 11.53 |
| 0.1270 | — | — | — | 1.15 | 2.30 | 2.87 | 5.75 | 11.50 |
| 0.1272 | — | — | — | 1.15 | 2.29 | 2.87 | 5.73 | 11.46 |
| 0.1274 | — | — | — | 1.14 | 2.28 | 2.86 | 5.71 | 11.43 |
| 0.1276 | — | — | — | 1.14 | 2.28 | 2.85 | 5.69 | 11.39 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1278 | — | — | — | 1.14 | 2.27 | 2.84 | 5.68 | 11.35 |
| 0.1280 | — | — | — | 1.13 | 2.26 | 2.83 | 5.66 | 11.32 |
| 0.1282 | — | — | — | 1.13 | 2.26 | 2.82 | 5.64 | 11.28 |
| 0.1284 | — | — | — | 1.12 | 2.25 | 2.81 | 5.62 | 11.25 |
| 0.1286 | — | — | — | 1.12 | 2.24 | 2.80 | 5.61 | 11.21 |
| 0.1288 | — | — | — | 1.12 | 2.24 | 2.79 | 5.59 | 11.18 |
| 0.1290 | — | — | — | 1.11 | 2.23 | 2.79 | 5.57 | 11.14 |
| 0.1292 | — | — | — | 1.11 | 2.22 | 2.78 | 5.55 | 11.11 |
| 0.1294 | — | — | — | 1.11 | 2.21 | 2.77 | 5.54 | 11.08 |
| 0.1296 | — | — | — | 1.10 | 2.21 | 2.76 | 5.52 | 11.04 |
| 0.1298 | — | — | — | 1.10 | 2.20 | 2.75 | 5.50 | 11.01 |
| 0.1300 | — | — | — | 1.10 | 2.19 | 2.74 | 5.49 | 10.97 |
| 0.1302 | — | — | — | 1.09 | 2.19 | 2.74 | 5.47 | 10.94 |
| 0.1304 | — | — | — | 1.09 | 2.18 | 2.73 | 5.45 | 10.91 |
| 0.1306 | — | — | — | 1.09 | 2.17 | 2.72 | 5.44 | 10.87 |
| 0.1308 | — | — | — | 1.08 | 2.17 | 2.71 | 5.42 | 10.84 |
| 0.1310 | — | — | — | 1.08 | 2.16 | 2.70 | 5.40 | 10.81 |
| 0.1312 | — | — | — | 1.08 | 2.15 | 2.69 | 5.39 | 10.77 |
| 0.1314 | — | — | — | 1.07 | 2.15 | 2.69 | 5.37 | 10.74 |
| 0.1316 | — | — | — | 1.07 | 2.14 | 2.68 | 5.35 | 10.71 |
| 0.1318 | — | — | — | 1.07 | 2.13 | 2.67 | 5.34 | 10.68 |
| 0.1320 | — | — | — | 1.06 | 2.13 | 2.66 | 5.32 | 10.64 |
| 0.1322 | — | — | — | 1.06 | 2.12 | 2.65 | 5.31 | 10.61 |
| 0.1324 | — | — | — | 1.06 | 2.12 | 2.65 | 5.29 | 10.58 |
| 0.1326 | — | — | — | 1.05 | 2.11 | 2.64 | 5.27 | 10.55 |
| 0.1328 | — | — | — | 1.05 | 2.10 | 2.63 | 5.26 | 10.52 |
| 0.1330 | — | — | — | 1.05 | 2.10 | 2.62 | 5.24 | 10.48 |
| 0.1332 | — | — | — | 1.05 | 2.09 | 2.61 | 5.23 | 10.45 |
| 0.1334 | — | — | — | 1.04 | 2.08 | 2.61 | 5.21 | 10.42 |
| 0.1336 | — | — | — | 1.04 | 2.08 | 2.60 | 5.19 | 10.39 |
| 0.1338 | — | — | — | 1.04 | 2.07 | 2.59 | 5.18 | 10.36 |
| 0.1340 | — | — | — | 1.03 | 2.07 | 2.58 | 5.16 | 10.33 |
| 0.1342 | — | — | — | 1.03 | 2.06 | 2.57 | 5.15 | 10.30 |
| 0.1344 | — | — | — | 1.03 | 2.05 | 2.57 | 5.13 | 10.27 |
| 0.1346 | — | — | — | 1.02 | 2.05 | 2.56 | 5.12 | 10.24 |
| 0.1348 | — | — | — | 1.02 | 2.04 | 2.55 | 5.10 | 10.21 |
| 0.1350 | — | — | — | 1.02 | 2.03 | 2.54 | 5.09 | 10.18 |
| 0.1352 | — | — | — | 1.01 | 2.03 | 2.54 | 5.07 | 10.15 |
| 0.1354 | — | — | — | 1.01 | 2.02 | 2.53 | 5.06 | 10.12 |
| 0.1356 | — | — | — | 1.01 | 2.02 | 2.52 | 5.04 | 10.09 |
| 0.1358 | — | — | — | 1.01 | 2.01 | 2.51 | 5.03 | 10.06 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1360 | — | — | — | 1.00 | 2.01 | 2.51 | 5.01 | 10.03 |
| 0.1362 | — | — | — | — | 2.00 | 2.50 | 5.00 | 10.00 |
| 0.1364 | — | — | — | — | 1.99 | 2.49 | 4.98 | 9.97 |
| 0.1366 | — | — | — | — | 1.99 | 2.48 | 4.97 | 9.94 |
| 0.1368 | — | — | — | — | 1.98 | 2.48 | 4.95 | 9.91 |
| 0.1370 | — | — | — | — | 1.98 | 2.47 | 4.94 | 9.88 |
| 0.1372 | — | — | — | — | 1.97 | 2.46 | 4.93 | 9.85 |
| 0.1374 | — | — | — | — | 1.96 | 2.46 | 4.91 | 9.82 |
| 0.1376 | — | — | — | — | 1.96 | 2.45 | 4.90 | 9.79 |
| 0.1378 | — | — | — | — | 1.95 | 2.44 | 4.88 | 9.77 |
| 0.1380 | — | — | — | — | 1.95 | 2.43 | 4.87 | 9.74 |
| 0.1382 | — | — | — | — | 1.94 | 2.43 | 4.85 | 9.71 |
| 0.1384 | — | — | — | — | 1.94 | 2.42 | 4.84 | 9.68 |
| 0.1386 | — | — | — | — | 1.93 | 2.41 | 4.83 | 9.65 |
| 0.1388 | — | — | — | — | 1.93 | 2.41 | 4.81 | 9.63 |
| 0.1390 | — | — | — | — | 1.92 | 2.40 | 4.80 | 9.60 |
| 0.1392 | — | — | — | — | 1.91 | 2.39 | 4.78 | 9.57 |
| 0.1394 | — | — | — | — | 1.91 | 2.39 | 4.77 | 9.54 |
| 0.1396 | — | — | — | — | 1.90 | 2.38 | 4.76 | 9.52 |
| 0.1398 | — | — | — | — | 1.90 | 2.37 | 4.74 | 9.49 |
| 0.1400 | — | — | — | — | 1.89 | 2.37 | 4.73 | 9.46 |
| 0.1402 | — | — | — | — | 1.89 | 2.36 | 4.72 | 9.43 |
| 0.1404 | — | — | — | — | 1.88 | 2.35 | 4.70 | 9.41 |
| 0.1406 | — | — | — | — | 1.88 | 2.35 | 4.69 | 9.38 |
| 0.1408 | — | — | — | — | 1.87 | 2.34 | 4.68 | 9.35 |
| 0.1410 | — | — | — | — | 1.87 | 2.33 | 4.66 | 9.33 |
| 0.1412 | — | — | — | — | 1.86 | 2.33 | 4.65 | 9.30 |
| 0.1414 | — | — | — | — | 1.85 | 2.32 | 4.64 | 9.28 |
| 0.1416 | — | — | — | — | 1.85 | 2.31 | 4.62 | 9.25 |
| 0.1418 | — | — | — | — | 1.84 | 2.31 | 4.61 | 9.22 |
| 0.1420 | — | — | — | — | 1.84 | 2.30 | 4.60 | 9.20 |
| 0.1422 | — | — | — | — | 1.83 | 2.29 | 4.59 | 9.17 |
| 0.1424 | — | — | — | — | 1.83 | 2.29 | 4.57 | 9.15 |
| 0.1426 | — | — | — | — | 1.82 | 2.28 | 4.56 | 9.12 |
| 0.1428 | — | — | — | — | 1.82 | 2.27 | 4.55 | 9.09 |
| 0.1430 | — | — | — | — | 1.81 | 2.27 | 4.53 | 9.07 |
| 0.1432 | — | — | — | — | 1.81 | 2.26 | 4.52 | 9.04 |
| 0.1434 | — | — | — | — | 1.80 | 2.25 | 4.51 | 9.02 |
| 0.1436 | — | — | — | — | 1.80 | 2.25 | 4.50 | 8.99 |
| 0.1438 | — | — | — | — | 1.79 | 2.24 | 4.48 | 8.97 |
| 0.1440 | — | — | — | — | 1.79 | 2.24 | 4.47 | 8.94 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1442 | — | — | — | — | 1.78 | 2.23 | 4.46 | 8.92 |
| 0.1444 | — | — | — | — | 1.78 | 2.22 | 4.45 | 8.89 |
| 0.1446 | — | — | — | — | 1.77 | 2.22 | 4.43 | 8.87 |
| 0.1448 | — | — | — | — | 1.77 | 2.21 | 4.42 | 8.84 |
| 0.1450 | — | — | — | — | 1.76 | 2.21 | 4.41 | 8.82 |
| 0.1452 | — | — | — | — | 1.76 | 2.20 | 4.40 | 8.80 |
| 0.1454 | — | — | — | — | 1.75 | 2.19 | 4.39 | 8.77 |
| 0.1456 | — | — | — | — | 1.75 | 2.19 | 4.37 | 8.75 |
| 0.1458 | — | — | — | — | 1.74 | 2.18 | 4.36 | 8.72 |
| 0.1460 | — | — | — | — | 1.74 | 2.18 | 4.35 | 8.70 |
| 0.1462 | — | — | — | — | 1.74 | 2.17 | 4.34 | 8.68 |
| 0.1464 | — | — | — | — | 1.73 | 2.16 | 4.33 | 8.65 |
| 0.1466 | — | — | — | — | 1.73 | 2.16 | 4.31 | 8.63 |
| 0.1468 | — | — | — | — | 1.72 | 2.15 | 4.30 | 8.61 |
| 0.1470 | — | — | — | — | 1.72 | 2.15 | 4.29 | 8.58 |
| 0.1472 | — | — | — | — | 1.71 | 2.14 | 4.28 | 8.56 |
| 0.1474 | — | — | — | — | 1.71 | 2.13 | 4.27 | 8.54 |
| 0.1476 | — | — | — | — | 1.70 | 2.13 | 4.26 | 8.51 |
| 0.1478 | — | — | — | — | 1.70 | 2.12 | 4.24 | 8.49 |
| 0.1480 | — | — | — | — | 1.69 | 2.12 | 4.23 | 8.47 |
| 0.1482 | — | — | — | — | 1.69 | 2.11 | 4.22 | 8.44 |
| 0.1484 | — | — | — | — | 1.68 | 2.11 | 4.21 | 8.42 |
| 0.1486 | — | — | — | — | 1.68 | 2.10 | 4.20 | 8.40 |
| 0.1488 | — | — | — | — | 1.67 | 2.09 | 4.19 | 8.38 |
| 0.1490 | — | — | — | — | 1.67 | 2.09 | 4.18 | 8.35 |
| 0.1492 | — | — | — | — | 1.67 | 2.08 | 4.17 | 8.33 |
| 0.1494 | — | — | — | — | 1.66 | 2.08 | 4.15 | 8.31 |
| 0.1496 | — | — | — | — | 1.66 | 2.07 | 4.14 | 8.29 |
| 0.1498 | — | — | — | — | 1.65 | 2.07 | 4.13 | 8.26 |
| 0.1500 | — | — | — | — | 1.65 | 2.06 | 4.12 | 8.24 |
| 0.1502 | — | — | — | — | 1.64 | 2.06 | 4.11 | 8.22 |
| 0.1504 | — | — | — | — | 1.64 | 2.05 | 4.10 | 8.20 |
| 0.1506 | — | — | — | — | 1.64 | 2.04 | 4.09 | 8.18 |
| 0.1508 | — | — | — | — | 1.63 | 2.04 | 4.08 | 8.16 |
| 0.1510 | — | — | — | — | 1.63 | 2.03 | 4.07 | 8.13 |
| 0.1512 | — | — | — | — | 1.62 | 2.03 | 4.06 | 8.11 |
| 0.1514 | — | — | — | — | 1.62 | 2.02 | 4.04 | 8.09 |
| 0.1516 | — | — | — | — | 1.61 | 2.02 | 4.03 | 8.07 |
| 0.1518 | — | — | — | — | 1.61 | 2.01 | 4.02 | 8.05 |
| 0.1520 | — | — | — | — | 1.61 | 2.01 | 4.01 | 8.03 |
| 0.1522 | — | — | — | — | 1.60 | 2.00 | 4.00 | 8.01 |
| 0.1524 | — | — | — | — | 1.60 | 2.00 | 3.99 | 7.98 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1526 | — | — | — | — | 1.59 | 1.99 | 3.98 | 7.96 |
| 0.1528 | — | — | — | — | 1.59 | 1.99 | 3.97 | 7.94 |
| 0.1530 | — | — | — | — | 1.58 | 1.98 | 3.96 | 7.92 |
| 0.1532 | — | — | — | — | 1.58 | 1.98 | 3.95 | 7.90 |
| 0.1534 | — | — | — | — | 1.58 | 1.97 | 3.94 | 7.88 |
| 0.1536 | — | — | — | — | 1.57 | 1.97 | 3.93 | 7.86 |
| 0.1538 | — | — | — | — | 1.57 | 1.96 | 3.92 | 7.84 |
| 0.1540 | — | — | — | — | 1.56 | 1.96 | 3.91 | 7.82 |
| 0.1542 | — | — | — | — | 1.56 | 1.95 | 3.90 | 7.80 |
| 0.1544 | — | — | — | — | 1.56 | 1.94 | 3.89 | 7.78 |
| 0.1546 | — | — | — | — | 1.55 | 1.94 | 3.88 | 7.76 |
| 0.1548 | — | — | — | — | 1.55 | 1.93 | 3.87 | 7.74 |
| 0.1550 | — | — | — | — | 1.54 | 1.93 | 3.86 | 7.72 |
| 0.1552 | — | — | — | — | 1.54 | 1.92 | 3.85 | 7.70 |
| 0.1554 | — | — | — | — | 1.54 | 1.92 | 3.84 | 7.68 |
| 0.1556 | — | — | — | — | 1.53 | 1.92 | 3.83 | 7.66 |
| 0.1558 | — | — | — | — | 1.53 | 1.91 | 3.82 | 7.64 |
| 0.1560 | — | — | — | — | 1.52 | 1.91 | 3.81 | 7.62 |
| 0.1562 | — | — | — | — | 1.52 | 1.90 | 3.80 | 7.60 |
| 0.1564 | — | — | — | — | 1.52 | 1.90 | 3.79 | 7.58 |
| 0.1566 | — | — | — | — | 1.51 | 1.89 | 3.78 | 7.56 |
| 0.1568 | — | — | — | — | 1.51 | 1.89 | 3.77 | 7.54 |
| 0.1570 | — | — | — | — | 1.50 | 1.88 | 3.76 | 7.52 |
| 0.1572 | — | — | — | — | 1.50 | 1.88 | 3.75 | 7.50 |
| 0.1574 | — | — | — | — | 1.50 | 1.87 | 3.74 | 7.49 |
| 0.1576 | — | — | — | — | 1.49 | 1.87 | 3.73 | 7.47 |
| 0.1578 | — | — | — | — | 1.49 | 1.86 | 3.72 | 7.45 |
| 0.1580 | — | — | — | — | 1.49 | 1.86 | 3.71 | 7.43 |
| 0.1582 | — | — | — | — | 1.48 | 1.85 | 3.70 | 7.41 |
| 0.1584 | — | — | — | — | 1.48 | 1.85 | 3.70 | 7.39 |
| 0.1586 | — | — | — | — | 1.47 | 1.84 | 3.69 | 7.37 |
| 0.1588 | — | — | — | — | 1.47 | 1.84 | 3.68 | 7.35 |
| 0.1590 | — | — | — | — | 1.47 | 1.83 | 3.67 | 7.34 |
| 0.1592 | — | — | — | — | 1.46 | 1.83 | 3.66 | 7.32 |
| 0.1594 | — | — | — | — | 1.46 | 1.82 | 3.65 | 7.30 |
| 0.1596 | — | — | — | — | 1.46 | 1.82 | 3.64 | 7.28 |
| 0.1598 | — | — | — | — | 1.45 | 1.82 | 3.63 | 7.26 |
| 0.1600 | — | — | — | — | 1.45 | 1.81 | 3.62 | 7.24 |
| 0.1602 | — | — | — | — | 1.45 | 1.81 | 3.61 | 7.23 |
| 0.1604 | — | — | — | — | 1.44 | 1.80 | 3.60 | 7.21 |
| 0.1606 | — | — | — | — | 1.44 | 1.80 | 3.59 | 7.19 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1608 | — | — | — | — | 1.43 | 1.79 | 3.59 | 7.17 |
| 0.1610 | — | — | — | — | 1.43 | 1.79 | 3.58 | 7.15 |
| 0.1612 | — | — | — | — | 1.43 | 1.78 | 3.57 | 7.14 |
| 0.1614 | — | — | — | — | 1.42 | 1.78 | 3.56 | 7.12 |
| 0.1616 | — | — | — | — | 1.42 | 1.78 | 3.55 | 7.10 |
| 0.1618 | — | — | — | — | 1.42 | 1.77 | 3.54 | 7.08 |
| 0.1620 | — | — | — | — | 1.41 | 1.77 | 3.53 | 7.07 |
| 0.1622 | — | — | — | — | 1.41 | 1.76 | 3.52 | 7.05 |
| 0.1624 | — | — | — | — | 1.41 | 1.76 | 3.52 | 7.03 |
| 0.1626 | — | — | — | — | 1.40 | 1.75 | 3.51 | 7.01 |
| 0.1628 | — | — | — | — | 1.40 | 1.75 | 3.50 | 7.00 |
| 0.1630 | — | — | — | — | 1.40 | 1.75 | 3.49 | 6.98 |
| 0.1632 | — | — | — | — | 1.39 | 1.74 | 3.48 | 6.96 |
| 0.1634 | — | — | — | — | 1.39 | 1.74 | 3.47 | 6.95 |
| 0.1636 | — | — | — | — | 1.39 | 1.73 | 3.46 | 6.93 |
| 0.1638 | — | — | — | — | 1.38 | 1.73 | 3.46 | 6.91 |
| 0.1640 | — | — | — | — | 1.38 | 1.72 | 3.45 | 6.90 |
| 0.1642 | — | — | — | — | 1.38 | 1.72 | 3.44 | 6.88 |
| 0.1644 | — | — | — | — | 1.37 | 1.72 | 3.43 | 6.86 |
| 0.1646 | — | — | — | — | 1.37 | 1.71 | 3.42 | 6.84 |
| 0.1648 | — | — | — | — | 1.37 | 1.71 | 3.41 | 6.83 |
| 0.1650 | — | — | — | — | 1.36 | 1.70 | 3.41 | 6.81 |
| 0.1652 | — | — | — | — | 1.36 | 1.70 | 3.40 | 6.80 |
| 0.1654 | — | — | — | — | 1.36 | 1.69 | 3.39 | 6.78 |
| 0.1656 | — | — | — | — | 1.35 | 1.69 | 3.38 | 6.76 |
| 0.1658 | — | — | — | — | 1.35 | 1.69 | 3.37 | 6.75 |
| 0.1660 | — | — | — | — | 1.35 | 1.68 | 3.36 | 6.73 |
| 0.1662 | — | — | — | — | 1.34 | 1.68 | 3.36 | 6.71 |
| 0.1664 | — | — | — | — | 1.34 | 1.67 | 3.35 | 6.70 |
| 0.1666 | — | — | — | — | 1.34 | 1.67 | 3.34 | 6.68 |
| 0.1668 | — | — | — | — | 1.33 | 1.67 | 3.33 | 6.67 |
| 0.1670 | — | — | — | — | 1.33 | 1.66 | 3.32 | 6.65 |
| 0.1672 | — | — | — | — | 1.33 | 1.66 | 3.32 | 6.63 |
| 0.1674 | — | — | — | — | 1.32 | 1.65 | 3.31 | 6.62 |
| 0.1676 | — | — | — | — | 1.32 | 1.65 | 3.30 | 6.60 |
| 0.1678 | — | — | — | — | 1.32 | 1.65 | 3.29 | 6.59 |
| 0.1680 | — | — | — | — | 1.31 | 1.64 | 3.28 | 6.57 |
| 0.1682 | — | — | — | — | 1.31 | 1.64 | 3.28 | 6.56 |
| 0.1684 | — | — | — | — | 1.31 | 1.64 | 3.27 | 6.54 |
| 0.1686 | — | — | — | — | 1.30 | 1.63 | 3.26 | 6.52 |
| 0.1688 | — | — | — | — | 1.30 | 1.63 | 3.25 | 6.51 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1690 | — | — | — | — | 1.30 | 1.62 | 3.25 | 6.49 |
| 0.1692 | — | — | — | — | 1.30 | 1.62 | 3.24 | 6.48 |
| 0.1694 | — | — | — | — | 1.29 | 1.62 | 3.23 | 6.46 |
| 0.1696 | — | — | — | — | 1.29 | 1.61 | 3.22 | 6.45 |
| 0.1698 | — | — | — | — | 1.29 | 1.61 | 3.22 | 6.43 |
| 0.1700 | — | — | — | — | 1.28 | 1.60 | 3.21 | 6.42 |
| 0.1702 | — | — | — | — | 1.28 | 1.60 | 3.20 | 6.40 |
| 0.1704 | — | — | — | — | 1.28 | 1.60 | 3.19 | 6.39 |
| 0.1706 | — | — | — | — | 1.27 | 1.59 | 3.19 | 6.37 |
| 0.1708 | — | — | — | — | 1.27 | 1.59 | 3.18 | 6.36 |
| 0.1710 | — | — | — | — | 1.27 | 1.59 | 3.17 | 6.34 |
| 0.1712 | — | — | — | — | 1.27 | 1.58 | 3.16 | 6.33 |
| 0.1714 | — | — | — | — | 1.26 | 1.58 | 3.16 | 6.31 |
| 0.1716 | — | — | — | — | 1.26 | 1.57 | 3.15 | 6.30 |
| 0.1718 | — | — | — | — | 1.26 | 1.57 | 3.14 | 6.28 |
| 0.1720 | — | — | — | — | 1.25 | 1.57 | 3.13 | 6.27 |
| 0.1722 | — | — | — | — | 1.25 | 1.56 | 3.13 | 6.25 |
| 0.1724 | — | — | — | — | 1.25 | 1.56 | 3.12 | 6.24 |
| 0.1726 | — | — | — | — | 1.24 | 1.56 | 3.11 | 6.23 |
| 0.1728 | — | — | — | — | 1.24 | 1.55 | 3.11 | 6.21 |
| 0.1730 | — | — | — | — | 1.24 | 1.55 | 3.10 | 6.20 |
| 0.1732 | — | — | — | — | 1.24 | 1.55 | 3.09 | 6.18 |
| 0.1734 | — | — | — | — | 1.23 | 1.54 | 3.08 | 6.17 |
| 0.1736 | — | — | — | — | 1.23 | 1.54 | 3.08 | 6.15 |
| 0.1738 | — | — | — | — | 1.23 | 1.54 | 3.07 | 6.14 |
| 0.1740 | — | — | — | — | 1.22 | 1.53 | 3.06 | 6.13 |
| 0.1742 | — | — | — | — | 1.22 | 1.53 | 3.06 | 6.11 |
| 0.1744 | — | — | — | — | 1.22 | 1.52 | 3.05 | 6.10 |
| 0.1746 | — | — | — | — | 1.22 | 1.52 | 3.04 | 6.08 |
| 0.1748 | — | — | — | — | 1.21 | 1.52 | 3.03 | 6.07 |
| 0.1750 | — | — | — | — | 1.21 | 1.51 | 3.03 | 6.06 |
| 0.1752 | — | — | — | — | 1.21 | 1.51 | 3.02 | 6.04 |
| 0.1754 | — | — | — | — | 1.21 | 1.51 | 3.01 | 6.03 |
| 0.1756 | — | — | — | — | 1.20 | 1.50 | 3.01 | 6.01 |
| 0.1758 | — | — | — | — | 1.20 | 1.50 | 3.00 | 6.00 |
| 0.1760 | — | — | — | — | 1.20 | 1.50 | 2.99 | 5.99 |
| 0.1762 | — | — | — | — | 1.19 | 1.49 | 2.99 | 5.97 |
| 0.1764 | — | — | — | — | 1.19 | 1.49 | 2.98 | 5.96 |
| 0.1766 | — | — | — | — | 1.19 | 1.49 | 2.97 | 5.95 |
| 0.1768 | — | — | — | — | 1.19 | 1.48 | 2.97 | 5.93 |
| 0.1770 | — | — | — | — | 1.18 | 1.48 | 2.96 | 5.92 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1772 | — | — | — | — | 1.18 | 1.48 | 2.95 | 5.91 |
| 0.1774 | — | — | — | — | 1.18 | 1.47 | 2.95 | 5.89 |
| 0.1776 | — | — | — | — | 1.18 | 1.47 | 2.94 | 5.88 |
| 0.1778 | — | — | — | — | 1.17 | 1.47 | 2.93 | 5.87 |
| 0.1780 | — | — | — | — | 1.17 | 1.46 | 2.93 | 5.85 |
| 0.1782 | — | — | — | — | 1.17 | 1.46 | 2.92 | 5.84 |
| 0.1784 | — | — | — | — | 1.17 | 1.46 | 2.91 | 5.83 |
| 0.1786 | — | — | — | — | 1.16 | 1.45 | 2.91 | 5.81 |
| 0.1788 | — | — | — | — | 1.16 | 1.45 | 2.90 | 5.80 |
| 0.1790 | — | — | — | — | 1.16 | 1.45 | 2.89 | 5.79 |
| 0.1792 | — | — | — | — | 1.15 | 1.44 | 2.89 | 5.77 |
| 0.1794 | — | — | — | — | 1.15 | 1.44 | 2.88 | 5.76 |
| 0.1796 | — | — | — | — | 1.15 | 1.44 | 2.87 | 5.75 |
| 0.1798 | — | — | — | — | 1.15 | 1.43 | 2.87 | 5.74 |
| 0.1800 | — | — | — | — | 1.14 | 1.43 | 2.86 | 5.72 |
| 0.1802 | — | — | — | — | 1.14 | 1.43 | 2.86 | 5.71 |
| 0.1804 | — | — | — | — | 1.14 | 1.42 | 2.85 | 5.70 |
| 0.1806 | — | — | — | — | 1.14 | 1.42 | 2.84 | 5.69 |
| 0.1808 | — | — | — | — | 1.13 | 1.42 | 2.84 | 5.67 |
| 0.1810 | — | — | — | — | 1.13 | 1.42 | 2.83 | 5.66 |
| 0.1812 | — | — | — | — | 1.13 | 1.41 | 2.82 | 5.65 |
| 0.1814 | — | — | — | — | 1.13 | 1.41 | 2.82 | 5.64 |
| 0.1816 | — | — | — | — | 1.12 | 1.41 | 2.81 | 5.62 |
| 0.1818 | — | — | — | — | 1.12 | 1.40 | 2.81 | 5.61 |
| 0.1820 | — | — | — | — | 1.12 | 1.40 | 2.80 | 5.60 |
| 0.1822 | — | — | — | — | 1.12 | 1.40 | 2.79 | 5.59 |
| 0.1824 | — | — | — | — | 1.11 | 1.39 | 2.79 | 5.57 |
| 0.1826 | — | — | — | — | 1.11 | 1.39 | 2.78 | 5.56 |
| 0.1828 | — | — | — | — | 1.11 | 1.39 | 2.77 | 5.55 |
| 0.1830 | — | — | — | — | 1.11 | 1.38 | 2.77 | 5.54 |
| 0.1832 | — | — | — | — | 1.11 | 1.38 | 2.76 | 5.53 |
| 0.1834 | — | — | — | — | 1.10 | 1.38 | 2.76 | 5.51 |
| 0.1836 | — | — | — | — | 1.10 | 1.38 | 2.75 | 5.50 |
| 0.1838 | — | — | — | — | 1.10 | 1.37 | 2.74 | 5.49 |
| 0.1840 | — | — | — | — | 1.10 | 1.37 | 2.74 | 5.48 |
| 0.1842 | — | — | — | — | 1.09 | 1.37 | 2.73 | 5.47 |
| 0.1844 | — | — | — | — | 1.09 | 1.36 | 2.73 | 5.45 |
| 0.1846 | — | — | — | — | 1.09 | 1.36 | 2.72 | 5.44 |
| 0.1848 | — | — | — | — | 1.09 | 1.36 | 2.71 | 5.43 |
| 0.1850 | — | — | — | — | 1.08 | 1.35 | 2.71 | 5.42 |
| 0.1852 | — | — | — | — | 1.08 | 1.35 | 2.70 | 5.41 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1854 | — | — | — | — | 1.08 | 1.35 | 2.70 | 5.40 |
| 0.1856 | — | — | — | — | 1.08 | 1.35 | 2.69 | 5.38 |
| 0.1858 | — | — | — | — | 1.07 | 1.34 | 2.69 | 5.37 |
| 0.1860 | — | — | — | — | 1.07 | 1.34 | 2.68 | 5.36 |
| 0.1862 | — | — | — | — | 1.07 | 1.34 | 2.67 | 5.35 |
| 0.1864 | — | — | — | — | 1.07 | 1.33 | 2.67 | 5.34 |
| 0.1866 | — | — | — | — | 1.07 | 1.33 | 2.66 | 5.33 |
| 0.1868 | — | — | — | — | 1.06 | 1.33 | 2.66 | 5.31 |
| 0.1870 | — | — | — | — | 1.06 | 1.33 | 2.65 | 5.30 |
| 0.1872 | — | — | — | — | 1.06 | 1.32 | 2.65 | 5.29 |
| 0.1874 | — | — | — | — | 1.06 | 1.32 | 2.64 | 5.28 |
| 0.1876 | — | — | — | — | 1.05 | 1.32 | 2.63 | 5.27 |
| 0.1878 | — | — | — | — | 1.05 | 1.31 | 2.63 | 5.26 |
| 0.1880 | — | — | — | — | 1.05 | 1.31 | 2.62 | 5.25 |
| 0.1882 | — | — | — | — | 1.05 | 1.31 | 2.62 | 5.24 |
| 0.1884 | — | — | — | — | 1.04 | 1.31 | 2.61 | 5.22 |
| 0.1886 | — | — | — | — | 1.04 | 1.30 | 2.61 | 5.21 |
| 0.1888 | — | — | — | — | 1.04 | 1.30 | 2.60 | 5.20 |
| 0.1890 | — | — | — | — | 1.04 | 1.30 | 2.60 | 5.19 |
| 0.1892 | — | — | — | — | 1.04 | 1.30 | 2.59 | 5.18 |
| 0.1894 | — | — | — | — | 1.03 | 1.29 | 2.58 | 5.17 |
| 0.1896 | — | — | — | — | 1.03 | 1.29 | 2.58 | 5.16 |
| 0.1898 | — | — | — | — | 1.03 | 1.29 | 2.57 | 5.15 |
| 0.1900 | — | — | — | — | 1.03 | 1.28 | 2.57 | 5.14 |
| 0.1902 | — | — | — | — | 1.03 | 1.28 | 2.56 | 5.13 |
| 0.1904 | — | — | — | — | 1.02 | 1.28 | 2.56 | 5.12 |
| 0.1906 | — | — | — | — | 1.02 | 1.28 | 2.55 | 5.10 |
| 0.1908 | — | — | — | — | 1.02 | 1.27 | 2.55 | 5.09 |
| 0.1910 | — | — | — | — | 1.02 | 1.27 | 2.54 | 5.08 |
| 0.1912 | — | — | — | — | 1.01 | 1.27 | 2.54 | 5.07 |
| 0.1914 | — | — | — | — | 1.01 | 1.27 | 2.53 | 5.06 |
| 0.1916 | — | — | — | — | 1.01 | 1.26 | 2.53 | 5.05 |
| 0.1918 | — | — | — | — | 1.01 | 1.26 | 2.52 | 5.04 |
| 0.1920 | — | — | — | — | 1.01 | 1.26 | 2.52 | 5.03 |
| 0.1922 | — | — | — | — | 1.00 | 1.26 | 2.51 | 5.02 |
| 0.1924 | — | — | — | — | 1.00 | 1.25 | 2.50 | 5.01 |
| 0.1926 | — | — | — | — | — | 1.25 | 2.50 | 5.00 |
| 0.1928 | — | — | — | — | — | 1.25 | 2.49 | 4.99 |
| 0.1930 | — | — | — | — | — | 1.24 | 2.49 | 4.98 |
| 0.1932 | — | — | — | — | — | 1.24 | 2.48 | 4.97 |
| 0.1934 | — | — | — | — | — | 1.24 | 2.48 | 4.96 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.1936 | — | — | — | — | — | 1.24 | 2.47 | 4.95 |
| 0.1938 | — | — | — | — | — | 1.23 | 2.47 | 4.94 |
| 0.1940 | — | — | — | — | — | 1.23 | 2.46 | 4.93 |
| 0.1942 | — | — | — | — | — | 1.23 | 2.46 | 4.92 |
| 0.1944 | — | — | — | — | — | 1.23 | 2.45 | 4.91 |
| 0.1946 | — | — | — | — | — | 1.22 | 2.45 | 4.90 |
| 0.1948 | — | — | — | — | — | 1.22 | 2.44 | 4.89 |
| 0.1950 | — | — | — | — | — | 1.22 | 2.44 | 4.88 |
| 0.1952 | — | — | — | — | — | 1.22 | 2.43 | 4.87 |
| 0.1954 | — | — | — | — | — | 1.21 | 2.43 | 4.86 |
| 0.1956 | — | — | — | — | — | 1.21 | 2.42 | 4.85 |
| 0.1958 | — | — | — | — | — | 1.21 | 2.42 | 4.84 |
| 0.1960 | — | — | — | — | — | 1.21 | 2.41 | 4.83 |
| 0.1962 | — | — | — | — | — | 1.20 | 2.41 | 4.82 |
| 0.1964 | — | — | — | — | — | 1.20 | 2.40 | 4.81 |
| 0.1966 | — | — | — | — | — | 1.20 | 2.40 | 4.80 |
| 0.1968 | — | — | — | — | — | 1.20 | 2.39 | 4.79 |
| 0.1970 | — | — | — | — | — | 1.19 | 2.39 | 4.78 |
| 0.1972 | — | — | — | — | — | 1.19 | 2.38 | 4.77 |
| 0.1974 | — | — | — | — | — | 1.19 | 2.38 | 4.76 |
| 0.1976 | — | — | — | — | — | 1.19 | 2.37 | 4.75 |
| 0.1978 | — | — | — | — | — | 1.19 | 2.37 | 4.74 |
| 0.1980 | — | — | — | — | — | 1.18 | 2.36 | 4.73 |
| 0.1982 | — | — | — | — | — | 1.18 | 2.36 | 4.72 |
| 0.1984 | — | — | — | — | — | 1.18 | 2.36 | 4.71 |
| 0.1986 | — | — | — | — | — | 1.18 | 2.35 | 4.70 |
| 0.1988 | — | — | — | — | — | 1.17 | 2.35 | 4.69 |
| 0.1990 | — | — | — | — | — | 1.17 | 2.34 | 4.68 |
| 0.1992 | — | — | — | — | — | 1.17 | 2.34 | 4.67 |
| 0.1994 | — | — | — | — | — | 1.17 | 2.33 | 4.66 |
| 0.1996 | — | — | — | — | — | 1.16 | 2.33 | 4.65 |
| 0.1998 | — | — | — | — | — | 1.16 | 2.32 | 4.65 |
| 0.2000 | — | — | — | — | — | 1.16 | 2.32 | 4.64 |
| 0.2002 | — | — | — | — | — | 1.16 | 2.31 | 4.63 |
| 0.2004 | — | — | — | — | — | 1.15 | 2.31 | 4.62 |
| 0.2006 | — | — | — | — | — | 1.15 | 2.30 | 4.61 |
| 0.2008 | — | — | — | — | — | 1.15 | 2.30 | 4.60 |
| 0.2010 | — | — | — | — | — | 1.15 | 2.29 | 4.59 |
| 0.2012 | — | — | — | — | — | 1.15 | 2.29 | 4.58 |
| 0.2014 | — | — | — | — | — | 1.14 | 2.29 | 4.57 |
| 0.2016 | — | — | — | — | — | 1.14 | 2.28 | 4.56 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.2018 | — | — | — | — | — | 1.14 | 2.28 | 4.55 |
| 0.2020 | — | — | — | — | — | 1.14 | 2.27 | 4.54 |
| 0.2022 | — | — | — | — | — | 1.13 | 2.27 | 4.54 |
| 0.2024 | — | — | — | — | — | 1.13 | 2.26 | 4.53 |
| 0.2026 | — | — | — | — | — | 1.13 | 2.26 | 4.52 |
| 0.2028 | — | — | — | — | — | 1.13 | 2.25 | 4.51 |
| 0.2030 | — | — | — | — | — | 1.13 | 2.25 | 4.50 |
| 0.2032 | — | — | — | — | — | 1.12 | 2.25 | 4.49 |
| 0.2034 | — | — | — | — | — | 1.12 | 2.24 | 4.48 |
| 0.2036 | — | — | — | — | — | 1.12 | 2.24 | 4.47 |
| 0.2038 | — | — | — | — | — | 1.12 | 2.23 | 4.46 |
| 0.2040 | — | — | — | — | — | 1.11 | 2.23 | 4.46 |
| 0.2042 | — | — | — | — | — | 1.11 | 2.22 | 4.45 |
| 0.2044 | — | — | — | — | — | 1.11 | 2.22 | 4.44 |
| 0.2046 | — | — | — | — | — | 1.11 | 2.21 | 4.43 |
| 0.2048 | — | — | — | — | — | 1.11 | 2.21 | 4.42 |
| 0.2050 | — | — | — | — | — | 1.10 | 2.21 | 4.41 |
| 0.2052 | — | — | — | — | — | 1.10 | 2.20 | 4.40 |
| 0.2054 | — | — | — | — | — | 1.10 | 2.20 | 4.40 |
| 0.2056 | — | — | — | — | — | 1.10 | 2.19 | 4.39 |
| 0.2058 | — | — | — | — | — | 1.09 | 2.19 | 4.38 |
| 0.2060 | — | — | — | — | — | 1.09 | 2.18 | 4.37 |
| 0.2062 | — | — | — | — | — | 1.09 | 2.18 | 4.36 |
| 0.2064 | — | — | — | — | — | 1.09 | 2.18 | 4.35 |
| 0.2066 | — | — | — | — | — | 1.09 | 2.17 | 4.34 |
| 0.2068 | — | — | — | — | — | 1.08 | 2.17 | 4.34 |
| 0.2070 | — | — | — | — | — | 1.08 | 2.16 | 4.33 |
| 0.2072 | — | — | — | — | — | 1.08 | 2.16 | 4.32 |
| 0.2074 | — | — | — | — | — | 1.08 | 2.16 | 4.31 |
| 0.2076 | — | — | — | — | — | 1.08 | 2.15 | 4.30 |
| 0.2078 | — | — | — | — | — | 1.07 | 2.15 | 4.29 |
| 0.2080 | — | — | — | — | — | 1.07 | 2.14 | 4.29 |
| 0.2082 | — | — | — | — | — | 1.07 | 2.14 | 4.28 |
| 0.2084 | — | — | — | — | — | 1.07 | 2.13 | 4.27 |
| 0.2086 | — | — | — | — | — | 1.07 | 2.13 | 4.26 |
| 0.2088 | — | — | — | — | — | 1.06 | 2.13 | 4.25 |
| 0.2090 | — | — | — | — | — | 1.06 | 2.12 | 4.25 |
| 0.2092 | — | — | — | — | — | 1.06 | 2.12 | 4.24 |
| 0.2094 | — | — | — | — | — | 1.06 | 2.11 | 4.23 |
| 0.2096 | — | — | — | — | — | 1.06 | 2.11 | 4.22 |
| 0.2098 | — | — | — | — | — | 1.05 | 2.11 | 4.21 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.009807 | 0.01961 | 0.04903 | 0.09807 | 0.19612 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 |
| | 维氏硬度 | | | | | | | |
| | HV 0.001 | HV 0.002 | HV 0.005 | HV 0.01 | HV 0.02 | HV 0.025 | HV 0.05 | HV 0.1 |
| 0.2100 | — | — | — | — | — | 1.05 | 2.10 | 4.21 |
| 0.2102 | — | — | — | — | — | 1.05 | 2.10 | 4.20 |
| 0.2104 | — | — | — | — | — | 1.05 | 2.09 | 4.19 |
| 0.2106 | — | — | — | — | — | 1.05 | 2.09 | 4.18 |
| 0.2108 | — | — | — | — | — | 1.04 | 2.09 | 4.17 |
| 0.2110 | — | — | — | — | — | 1.04 | 2.08 | 4.17 |

**表 3-15　平面维氏硬度值计算表（HV0.2～HV3）**

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0110 | 3065 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0112 | 2956 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0114 | 2853 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0116 | 2756 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0118 | 2663 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0120 | 2575 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0122 | 2491 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0124 | 2412 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0126 | 2336 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0128 | 2263 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0130 | 2194 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0132 | 2128 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0134 | 2065 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0136 | 2005 | — | — | — | — | — | — |
| 0.0138 | 1947 | 2921 | — | — | — | — | — |
| 0.0140 | 1892 | 2838 | — | — | — | — | — |
| 0.0142 | 1839 | 2759 | — | — | — | — | — |
| 0.0144 | 1788 | 2683 | — | — | — | — | — |
| 0.0146 | 1740 | 2610 | — | — | — | — | — |
| 0.0148 | 1693 | 2540 | — | — | — | — | — |
| 0.0150 | 1648 | 2473 | — | — | — | — | — |
| 0.0152 | 1605 | 2408 | — | — | — | — | — |
| 0.0154 | 1564 | 2346 | — | — | — | — | — |
| 0.0156 | 1524 | 2286 | — | — | — | — | — |
| 0.0158 | 1485 | 2229 | — | — | — | — | — |
| 0.0160 | 1449 | 2173 | — | — | — | — | — |
| 0.0162 | 1413 | 2120 | — | — | — | — | — |
| 0.0164 | 1379 | 2068 | — | — | — | — | — |
| 0.0166 | 1346 | 2019 | — | — | — | — | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0168 | 1314 | 1971 | — | — | — | — | — |
| 0.0170 | 1283 | 1925 | — | — | — | — | — |
| 0.0172 | 1253 | 1881 | — | — | — | — | — |
| 0.0174 | 1225 | 1838 | — | — | — | — | — |
| 0.0176 | 1197 | 1796 | 2993 | — | — | — | — |
| 0.0178 | 1170 | 1756 | 2926 | — | — | — | — |
| 0.0180 | 1145 | 1717 | 2862 | — | — | — | — |
| 0.0182 | 1120 | 1680 | 2799 | — | — | — | — |
| 0.0184 | 1095 | 1643 | 2739 | — | — | — | — |
| 0.0186 | 1072 | 1608 | 2680 | — | — | — | — |
| 0.0188 | 1049 | 1574 | 2623 | — | — | — | — |
| 0.0190 | 1027 | 1541 | 2568 | — | — | — | — |
| 0.0192 | 1006 | 1509 | 2515 | — | — | — | — |
| 0.0194 | 985 | 1478 | 2463 | — | — | — | — |
| 0.0196 | 965 | 1448 | 2413 | — | — | — | — |
| 0.0198 | 946 | 1419 | 2365 | — | — | — | — |
| 0.0200 | 927 | 1391 | 2318 | — | — | — | — |
| 0.0202 | 909 | 1363 | 2272 | — | — | — | — |
| 0.0204 | 891 | 1337 | 2228 | — | — | — | — |
| 0.0206 | 874 | 1311 | 2185 | — | — | — | — |
| 0.0208 | 857 | 1286 | 2143 | — | — | — | — |
| 0.0210 | 841 | 1262 | 2102 | — | — | — | — |
| 0.0212 | 825 | 1238 | 2063 | — | — | — | — |
| 0.0214 | 810 | 1215 | 2025 | — | — | — | — |
| 0.0216 | 795 | 1192 | 1987 | — | — | — | — |
| 0.0218 | 780 | 1171 | 1951 | — | — | — | — |
| 0.0220 | 766 | 1149 | 1916 | — | — | — | — |
| 0.0222 | 752 | 1129 | 1881 | — | — | — | — |
| 0.0224 | 739 | 1109 | 1848 | — | — | — | — |
| 0.0226 | 726 | 1089 | 1815 | — | — | — | — |
| 0.0228 | 713 | 1070 | 1784 | — | — | — | — |
| 0.0230 | 701 | 1052 | 1753 | — | — | — | — |
| 0.0232 | 689 | 1034 | 1723 | — | — | — | — |
| 0.0234 | 677 | 1016 | 1693 | — | — | — | — |
| 0.0236 | 666 | 999 | 1665 | — | — | — | — |
| 0.0238 | 655 | 982 | 1637 | — | — | — | — |
| 0.0240 | 644 | 966 | 1610 | — | — | — | — |
| 0.0242 | 633 | 950 | 1583 | — | — | — | — |
| 0.0244 | 623 | 934 | 1557 | — | — | — | — |
| 0.0246 | 613 | 919 | 1532 | — | — | — | — |
| 0.0248 | 603 | 905 | 1507 | — | — | — | — |
| 0.0250 | 593 | 890 | 1483 | 2967 | — | — | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0252 | 584 | 876 | 1460 | 2920 | — | — | — |
| 0.0254 | 575 | 862 | 1437 | 2874 | — | — | — |
| 0.0256 | 566 | 849 | 1415 | 2830 | — | — | — |
| 0.0258 | 557 | 836 | 1393 | 2786 | — | — | — |
| 0.0260 | 549 | 823 | 1372 | 2743 | — | — | — |
| 0.0262 | 540 | 810 | 1351 | 2702 | — | — | — |
| 0.0264 | 532 | 798 | 1330 | 2661 | — | — | — |
| 0.0266 | 524 | 786 | 1310 | 2621 | — | — | — |
| 0.0268 | 516 | 775 | 1291 | 2582 | — | — | — |
| 0.0270 | 509 | 763 | 1272 | 2544 | — | — | — |
| 0.0272 | 501 | 752 | 1253 | 2507 | — | — | — |
| 0.0274 | 494 | 741 | 1235 | 2470 | — | — | — |
| 0.0276 | 487 | 730 | 1217 | 2434 | — | — | — |
| 0.0278 | 480 | 720 | 1200 | 2400 | — | — | — |
| 0.0280 | 473 | 710 | 1183 | 2365 | — | — | — |
| 0.0282 | 466 | 700 | 1166 | 2332 | — | — | — |
| 0.0284 | 460 | 690 | 1150 | 2299 | — | — | — |
| 0.0286 | 453 | 680 | 1133 | 2267 | — | — | — |
| 0.0288 | 447 | 671 | 1118 | 2236 | — | — | — |
| 0.0290 | 441 | 662 | 1102 | 2205 | — | — | — |
| 0.0292 | 435 | 652 | 1087 | 2175 | — | — | — |
| 0.0294 | 429 | 644 | 1073 | 2146 | — | — | — |
| 0.0296 | 423 | 635 | 1058 | 2117 | — | — | — |
| 0.0298 | 418 | 626 | 1044 | 2088 | — | — | — |
| 0.0300 | 412 | 618 | 1030 | 2061 | — | — | — |
| 0.0302 | 407 | 610 | 1017 | 2033 | — | — | — |
| 0.0304 | 401 | 602 | 1003 | 2007 | — | — | — |
| 0.0306 | 396 | 594 | 990 | 1981 | — | — | — |
| 0.0308 | 391 | 586 | 977 | 1955 | — | — | — |
| 0.0310 | 386 | 579 | 965 | 1930 | — | — | — |
| 0.0312 | 381 | 572 | 952 | 1905 | — | — | — |
| 0.0314 | 376 | 564 | 940 | 1881 | — | — | — |
| 0.0316 | 371 | 557 | 928 | 1857 | — | — | — |
| 0.0318 | 367 | 550 | 917 | 1834 | — | — | — |
| 0.0320 | 362 | 543 | 905 | 1811 | — | — | — |
| 0.0322 | 358 | 537 | 894 | 1789 | — | — | — |
| 0.0324 | 353 | 530 | 883 | 1767 | — | — | — |
| 0.0326 | 349 | 523 | 872 | 1745 | — | — | — |
| 0.0328 | 345 | 517 | 862 | 1724 | — | — | — |
| 0.0330 | 341 | 511 | 851 | 1703 | — | — | — |
| 0.0332 | 336 | 505 | 841 | 1682 | — | — | — |
| 0.0334 | 332 | 499 | 831 | 1662 | — | — | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0336 | 328 | 493 | 821 | 1643 | — | — | — |
| 0.0338 | 325 | 487 | 812 | 1623 | — | — | — |
| 0.0340 | 321 | 481 | 802 | 1604 | — | — | — |
| 0.0342 | 317 | 476 | 793 | 1586 | — | — | — |
| 0.0344 | 313 | 470 | 783 | 1567 | — | — | — |
| 0.0346 | 310 | 465 | 774 | 1549 | — | — | — |
| 0.0348 | 306 | 459 | 766 | 1531 | — | — | — |
| 0.0350 | 303 | 454 | 757 | 1514 | — | — | — |
| 0.0352 | 299 | 449 | 748 | 1497 | 2993 | — | — |
| 0.0354 | 296 | 444 | 740 | 1480 | 2959 | — | — |
| 0.0356 | 293 | 439 | 732 | 1463 | 2926 | — | — |
| 0.0358 | 289 | 434 | 723 | 1447 | 2893 | — | — |
| 0.0360 | 286 | 429 | 715 | 1431 | 2861 | — | — |
| 0.0362 | 283 | 425 | 708 | 1415 | 2830 | — | — |
| 0.0364 | 280 | 420 | 700 | 1400 | 2799 | — | — |
| 0.0366 | 277 | 415 | 692 | 1384 | 2768 | — | — |
| 0.0368 | 274 | 411 | 685 | 1369 | 2738 | — | — |
| 0.0370 | 271 | 406 | 677 | 1355 | 2709 | — | — |
| 0.0372 | 268 | 402 | 670 | 1340 | 2680 | — | — |
| 0.0374 | 265 | 398 | 663 | 1326 | 2651 | — | — |
| 0.0376 | 262 | 394 | 656 | 1312 | 2623 | — | — |
| 0.0378 | 260 | 389 | 649 | 1298 | 2595 | — | — |
| 0.0380 | 257 | 385 | 642 | 1284 | 2568 | — | — |
| 0.0382 | 254 | 381 | 635 | 1271 | 2541 | — | — |
| 0.0384 | 251 | 377 | 629 | 1258 | 2515 | — | — |
| 0.0386 | 249 | 373 | 622 | 1245 | 2489 | — | — |
| 0.0388 | 246 | 370 | 616 | 1232 | 2463 | — | — |
| 0.0390 | 244 | 366 | 610 | 1219 | 2438 | — | — |
| 0.0392 | 241 | 362 | 603 | 1207 | 2413 | — | — |
| 0.0394 | 239 | 358 | 597 | 1195 | 2389 | 2987 | — |
| 0.0396 | 236 | 355 | 591 | 1183 | 2365 | 2957 | — |
| 0.0398 | 234 | 351 | 585 | 1171 | 2341 | 2927 | — |
| 0.0400 | 232 | 348 | 579 | 1159 | 2318 | 2898 | — |
| 0.0402 | 229 | 344 | 574 | 1148 | 2295 | 2869 | — |
| 0.0404 | 227 | 341 | 568 | 1136 | 2272 | 2841 | — |
| 0.0406 | 225 | 338 | 562 | 1125 | 2250 | 2813 | — |
| 0.0408 | 223 | 334 | 557 | 1114 | 2228 | 2785 | — |
| 0.0410 | 221 | 331 | 552 | 1103 | 2206 | 2758 | — |
| 0.0412 | 218 | 328 | 546 | 1093 | 2185 | 2732 | — |
| 0.0414 | 216 | 325 | 541 | 1082 | 2164 | 2705 | — |
| 0.0416 | 214 | 321 | 536 | 1072 | 2143 | 2679 | — |
| 0.0418 | 212 | 318 | 531 | 1061 | 2122 | 2654 | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0420 | 210 | 315 | 526 | 1051 | 2102 | 2629 | — |
| 0.0422 | 208 | 312 | 521 | 1041 | 2082 | 2604 | — |
| 0.0424 | 206 | 309 | 516 | 1032 | 2063 | 2579 | — |
| 0.0426 | 204 | 307 | 511 | 1022 | 2043 | 2555 | — |
| 0.0428 | 202 | 304 | 506 | 1012 | 2024 | 2531 | — |
| 0.0430 | 201 | 301 | 501 | 1003 | 2006 | 2508 | — |
| 0.0432 | 199 | 298 | 497 | 994 | 1987 | 2485 | 2981 |
| 0.0434 | 197 | 295 | 492 | 985 | 1969 | 2462 | 2954 |
| 0.0436 | 195 | 293 | 488 | 976 | 1951 | 2439 | 2927 |
| 0.0438 | 193 | 290 | 483 | 967 | 1933 | 2417 | 2900 |
| 0.0440 | 192 | 287 | 479 | 958 | 1915 | 2395 | 2874 |
| 0.0442 | 190 | 285 | 475 | 949 | 1898 | 2373 | 2848 |
| 0.0444 | 188 | 282 | 470 | 941 | 1881 | 2352 | 2822 |
| 0.0446 | 186 | 280 | 466 | 932 | 1864 | 2331 | 2797 |
| 0.0448 | 185 | 277 | 462 | 924 | 1848 | 2310 | 2772 |
| 0.0450 | 183 | 275 | 458 | 916 | 1831 | 2290 | 2747 |
| 0.0452 | 182 | 272 | 454 | 908 | 1815 | 2270 | 2723 |
| 0.0454 | 180 | 270 | 450 | 900 | 1799 | 2250 | 2699 |
| 0.0456 | 178 | 268 | 446 | 892 | 1783 | 2230 | 2675 |
| 0.0458 | 177 | 265 | 442 | 884 | 1768 | 2210 | 2652 |
| 0.0460 | 175 | 263 | 438 | 876 | 1752 | 2191 | 2629 |
| 0.0462 | 174 | 261 | 434 | 869 | 1737 | 2172 | 2606 |
| 0.0464 | 172 | 258 | 431 | 861 | 1722 | 2154 | 2584 |
| 0.0466 | 171 | 256 | 427 | 854 | 1708 | 2135 | 2562 |
| 0.0468 | 169 | 254 | 423 | 847 | 1693 | 2117 | 2540 |
| 0.0470 | 168 | 252 | 420 | 840 | 1679 | 2099 | 2518 |
| 0.0472 | 166 | 250 | 416 | 832 | 1665 | 2081 | 2497 |
| 0.0474 | 165 | 248 | 413 | 825 | 1650 | 2064 | 2476 |
| 0.0476 | 164 | 246 | 409 | 818 | 1637 | 2046 | 2455 |
| 0.0478 | 162 | 243 | 406 | 812 | 1623 | 2029 | 2435 |
| 0.0480 | 161 | 241 | 402 | 805 | 1609 | 2012 | 2415 |
| 0.0482 | 160 | 239 | 399 | 798 | 1596 | 1996 | 2395 |
| 0.0484 | 158 | 237 | 396 | 792 | 1583 | 1979 | 2375 |
| 0.0486 | 157 | 236 | 393 | 785 | 1570 | 1963 | 2355 |
| 0.0488 | 156 | 234 | 389 | 779 | 1557 | 1947 | 2336 |
| 0.0490 | 154 | 232 | 386 | 772 | 1544 | 1931 | 2317 |
| 0.0492 | 153 | 230 | 383 | 766 | 1532 | 1915 | 2298 |
| 0.0494 | 152 | 228 | 380 | 760 | 1520 | 1900 | 2280 |
| 0.0496 | 151 | 226 | 377 | 754 | 1507 | 1885 | 2261 |
| 0.0498 | 150 | 224 | 374 | 748 | 1495 | 1870 | 2243 |
| 0.0500 | 148 | 223 | 371 | 742 | 1483 | 1855 | 2225 |
| 0.0502 | 147 | 221 | 368 | 736 | 1472 | 1840 | 2208 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0504 | 146 | 219 | 365 | 730 | 1460 | 1825 | 2190 |
| 0.0506 | 145 | 217 | 362 | 724 | 1448 | 1811 | 2173 |
| 0.0508 | 144 | 216 | 359 | 719 | 1437 | 1797 | 2156 |
| 0.0510 | 143 | 214 | 356 | 713 | 1426 | 1783 | 2139 |
| 0.0512 | 141 | 212 | 354 | 707 | 1415 | 1769 | 2122 |
| 0.0514 | 140 | 211 | 351 | 702 | 1404 | 1755 | 2106 |
| 0.0516 | 139 | 209 | 348 | 697 | 1393 | 1741 | 2089 |
| 0.0518 | 138 | 207 | 346 | 691 | 1382 | 1728 | 2073 |
| 0.0520 | 137 | 206 | 343 | 686 | 1371 | 1715 | 2057 |
| 0.0522 | 136 | 204 | 340 | 681 | 1361 | 1702 | 2042 |
| 0.0524 | 135 | 203 | 338 | 675 | 1351 | 1689 | 2026 |
| 0.0526 | 134 | 201 | 335 | 670 | 1340 | 1676 | 2011 |
| 0.0528 | 133 | 200 | 333 | 665 | 1330 | 1663 | 1996 |
| 0.0530 | 132 | 198 | 330 | 660 | 1320 | 1651 | 1981 |
| 0.0532 | 131 | 197 | 328 | 655 | 1310 | 1638 | 1966 |
| 0.0534 | 130 | 195 | 325 | 650 | 1300 | 1626 | 1951 |
| 0.0536 | 129 | 194 | 323 | 646 | 1291 | 1614 | 1936 |
| 0.0538 | 128 | 192 | 320 | 641 | 1281 | 1602 | 1922 |
| 0.0540 | 127 | 191 | 318 | 636 | 1272 | 1590 | 1908 |
| 0.0542 | 126 | 189 | 316 | 631 | 1262 | 1578 | 1894 |
| 0.0544 | 125 | 188 | 313 | 627 | 1253 | 1567 | 1880 |
| 0.0546 | 124 | 187 | 311 | 622 | 1244 | 1555 | 1866 |
| 0.0548 | 123 | 185 | 309 | 618 | 1235 | 1544 | 1853 |
| 0.0550 | 123 | 184 | 306 | 613 | 1226 | 1533 | 1839 |
| 0.0552 | 122 | 183 | 304 | 609 | 1217 | 1522 | 1826 |
| 0.0554 | 121 | 181 | 302 | 604 | 1208 | 1511 | 1813 |
| 0.0556 | 120 | 180 | 300 | 600 | 1200 | 1500 | 1800 |
| 0.0558 | 119 | 179 | 298 | 596 | 1191 | 1489 | 1787 |
| 0.0560 | 118 | 177 | 296 | 591 | 1182 | 1479 | 1774 |
| 0.0562 | 117 | 176 | 294 | 587 | 1174 | 1468 | 1761 |
| 0.0564 | 117 | 175 | 291 | 583 | 1166 | 1458 | 1749 |
| 0.0566 | 116 | 174 | 289 | 579 | 1158 | 1447 | 1737 |
| 0.0568 | 115 | 172 | 287 | 575 | 1149 | 1437 | 1724 |
| 0.0570 | 114 | 171 | 285 | 571 | 1141 | 1427 | 1712 |
| 0.0572 | 113 | 170 | 283 | 567 | 1133 | 1417 | 1700 |
| 0.0574 | 113 | 169 | 281 | 563 | 1125 | 1407 | 1689 |
| 0.0576 | 112 | 168 | 279 | 559 | 1118 | 1398 | 1677 |
| 0.0578 | 111 | 167 | 278 | 555 | 1110 | 1388 | 1665 |
| 0.0580 | 110 | 165 | 276 | 551 | 1102 | 1378 | 1654 |
| 0.0582 | 109 | 164 | 274 | 547 | 1095 | 1369 | 1642 |
| 0.0584 | 109 | 163 | 272 | 544 | 1087 | 1360 | 1631 |
| 0.0586 | 108 | 162 | 270 | 540 | 1080 | 1350 | 1620 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0588 | 107 | 161 | 268 | 536 | 1073 | 1341 | 1609 |
| 0.0590 | 107 | 160 | 266 | 533 | 1065 | 1332 | 1598 |
| 0.0592 | 106 | 159 | 265 | 529 | 1058 | 1323 | 1587 |
| 0.0594 | 105 | 158 | 263 | 526 | 1051 | 1314 | 1577 |
| 0.0596 | 104 | 157 | 261 | 522 | 1044 | 1305 | 1566 |
| 0.0598 | 104 | 156 | 259 | 519 | 1037 | 1297 | 1556 |
| 0.0600 | 103 | 155 | 258 | 515 | 1030 | 1288 | 1545 |
| 0.0602 | 102 | 154 | 256 | 512 | 1023 | 1279 | 1535 |
| 0.0604 | 102 | 152 | 254 | 508 | 1016 | 1271 | 1525 |
| 0.0606 | 101 | 151 | 252 | 505 | 1010 | 1263 | 1515 |
| 0.0608 | 100 | 150 | 251 | 502 | 1003 | 1254 | 1505 |
| 0.0610 | 99.7 | 150 | 249 | 498 | 997 | 1246 | 1495 |
| 0.0612 | 99.0 | 149 | 248 | 495 | 990 | 1238 | 1485 |
| 0.0614 | 98.4 | 148 | 246 | 492 | 984 | 1230 | 1476 |
| 0.0616 | 97.7 | 147 | 244 | 489 | 977 | 1222 | 1466 |
| 0.0618 | 97.1 | 146 | 243 | 486 | 971 | 1214 | 1457 |
| 0.0620 | 96.5 | 145 | 241 | 482 | 965 | 1206 | 1447 |
| 0.0622 | 95.8 | 144 | 240 | 479 | 958 | 1198 | 1438 |
| 0.0624 | 95.2 | 143 | 238 | 476 | 952 | 1191 | 1429 |
| 0.0626 | 94.6 | 142 | 237 | 473 | 946 | 1183 | 1420 |
| 0.0628 | 94.0 | 141 | 235 | 470 | 940 | 1176 | 1411 |
| 0.0630 | 93.4 | 140 | 234 | 467 | 934 | 1168 | 1402 |
| 0.0632 | 92.8 | 139 | 232 | 464 | 928 | 1161 | 1393 |
| 0.0634 | 92.3 | 138 | 231 | 461 | 923 | 1154 | 1384 |
| 0.0636 | 91.7 | 138 | 229 | 458 | 917 | 1146 | 1375 |
| 0.0638 | 91.1 | 137 | 228 | 456 | 911 | 1139 | 1367 |
| 0.0640 | 90.5 | 136 | 226 | 453 | 905 | 1132 | 1358 |
| 0.0642 | 90.0 | 135 | 225 | 450 | 900 | 1125 | 1350 |
| 0.0644 | 89.4 | 134 | 224 | 447 | 894 | 1118 | 1341 |
| 0.0646 | 88.9 | 133 | 222 | 444 | 889 | 1111 | 1333 |
| 0.0648 | 88.3 | 132 | 221 | 442 | 883 | 1104 | 1325 |
| 0.0650 | 87.8 | 132 | 219 | 439 | 878 | 1097 | 1317 |
| 0.0652 | 87.2 | 131 | 218 | 436 | 872 | 1091 | 1309 |
| 0.0654 | 86.7 | 130 | 217 | 434 | 867 | 1084 | 1301 |
| 0.0656 | 86.2 | 129 | 215 | 431 | 862 | 1077 | 1293 |
| 0.0658 | 85.6 | 128 | 214 | 428 | 856 | 1071 | 1285 |
| 0.0660 | 85.1 | 128 | 213 | 426 | 851 | 1064 | 1277 |
| 0.0662 | 84.6 | 127 | 212 | 423 | 846 | 1058 | 1269 |
| 0.0664 | 84.1 | 126 | 210 | 421 | 841 | 1052 | 1262 |
| 0.0666 | 83.6 | 125 | 209 | 418 | 836 | 1045 | 1254 |
| 0.0668 | 83.1 | 125 | 208 | 416 | 831 | 1039 | 1247 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0670 | 82.6 | 124 | 207 | 413 | 826 | 1033 | 1239 |
| 0.0672 | 82.1 | 123 | 205 | 411 | 821 | 1027 | 1232 |
| 0.0674 | 81.6 | 122 | 204 | 408 | 816 | 1021 | 1225 |
| 0.0676 | 81.1 | 122 | 203 | 406 | 811 | 1015 | 1217 |
| 0.0678 | 80.7 | 121 | 202 | 403 | 807 | 1009 | 1210 |
| 0.0680 | 80.2 | 120 | 201 | 401 | 802 | 1003 | 1203 |
| 0.0682 | 79.7 | 120 | 199 | 399 | 797 | 997 | 1196 |
| 0.0684 | 79.3 | 119 | 198 | 396 | 793 | 991 | 1189 |
| 0.0686 | 78.8 | 118 | 197 | 394 | 788 | 985 | 1182 |
| 0.0688 | 78.3 | 118 | 196 | 392 | 783 | 980 | 1175 |
| 0.0690 | 77.9 | 117 | 195 | 390 | 779 | 974 | 1169 |
| 0.0692 | 77.4 | 116 | 194 | 387 | 774 | 968 | 1162 |
| 0.0694 | 77.0 | 116 | 193 | 385 | 770 | 963 | 1155 |
| 0.0696 | 76.6 | 115 | 191 | 383 | 766 | 957 | 1148 |
| 0.0698 | 76.1 | 114 | 190 | 381 | 761 | 952 | 1142 |
| 0.0700 | 75.7 | 114 | 189 | 378 | 757 | 946 | 1135 |
| 0.0705 | 74.6 | 112 | 187 | 373 | 746 | 933 | 1119 |
| 0.0710 | 73.6 | 110 | 184 | 368 | 736 | 920 | 1104 |
| 0.0715 | 72.5 | 109 | 181 | 363 | 725 | 907 | 1088 |
| 0.0720 | 71.5 | 107 | 179 | 358 | 715 | 894 | 1073 |
| 0.0725 | 70.5 | 106 | 176 | 353 | 705 | 882 | 1058 |
| 0.0730 | 69.6 | 104 | 174 | 348 | 696 | 870 | 1044 |
| 0.0735 | 68.6 | 103 | 172 | 343 | 686 | 858 | 1030 |
| 0.0740 | 67.7 | 102 | 169 | 339 | 677 | 847 | 1016 |
| 0.0745 | 66.8 | 100 | 167 | 334 | 668 | 835 | 1002 |
| 0.0750 | 65.9 | 98.9 | 165 | 330 | 659 | 824 | 989 |
| 0.0755 | 65.1 | 97.6 | 163 | 325 | 651 | 813 | 976 |
| 0.0760 | 64.2 | 96.3 | 161 | 321 | 642 | 803 | 963 |
| 0.0765 | 63.4 | 95.1 | 158 | 317 | 634 | 792 | 951 |
| 0.0770 | 62.5 | 93.8 | 156 | 313 | 625 | 782 | 938 |
| 0.0775 | 61.7 | 92.6 | 154 | 309 | 617 | 772 | 926 |
| 0.0780 | 61.0 | 91.4 | 152 | 305 | 610 | 762 | 914 |
| 0.0785 | 60.2 | 90.3 | 150 | 301 | 602 | 752 | 903 |
| 0.0790 | 59.4 | 89.1 | 149 | 297 | 594 | 743 | 891 |
| 0.0795 | 58.7 | 88.0 | 147 | 293 | 587 | 734 | 880 |
| 0.0800 | 57.9 | 86.9 | 145 | 290 | 579 | 724 | 869 |
| 0.0805 | 57.2 | 85.9 | 143 | 286 | 572 | 716 | 859 |
| 0.0810 | 56.5 | 84.8 | 141 | 283 | 565 | 707 | 848 |
| 0.0815 | 55.8 | 83.8 | 140 | 279 | 558 | 698 | 838 |
| 0.0820 | 55.1 | 82.7 | 138 | 276 | 551 | 690 | 827 |
| 0.0825 | 54.5 | 81.7 | 136 | 272 | 545 | 681 | 817 |
| 0.0830 | 53.8 | 80.8 | 135 | 269 | 538 | 673 | 808 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.0835 | 53.2 | 79.8 | 133 | 266 | 532 | 665 | 798 |
| 0.0840 | 52.6 | 78.8 | 131 | 263 | 526 | 657 | 788 |
| 0.0845 | 51.9 | 77.9 | 130 | 260 | 519 | 649 | 779 |
| 0.0850 | 51.3 | 77.0 | 128 | 257 | 513 | 642 | 770 |
| 0.0855 | 50.7 | 76.1 | 127 | 254 | 507 | 634 | 761 |
| 0.0860 | 50.1 | 75.2 | 125 | 251 | 501 | 627 | 752 |
| 0.0865 | 49.6 | 74.4 | 124 | 248 | 496 | 620 | 744 |
| 0.0870 | 49.0 | 73.5 | 122 | 245 | 490 | 613 | 735 |
| 0.0875 | 48.4 | 72.7 | 121 | 242 | 484 | 606 | 727 |
| 0.0880 | 47.9 | 71.8 | 120 | 239 | 479 | 599 | 718 |
| 0.0885 | 47.3 | 71.0 | 118 | 237 | 473 | 592 | 710 |
| 0.0890 | 46.8 | 70.2 | 117 | 234 | 468 | 585 | 702 |
| 0.0895 | 46.3 | 69.5 | 116 | 232 | 463 | 579 | 695 |
| 0.0900 | 45.8 | 68.7 | 114 | 229 | 458 | 572 | 687 |
| 0.0905 | 45.3 | 67.9 | 113 | 226 | 453 | 566 | 679 |
| 0.0910 | 44.8 | 67.2 | 112 | 224 | 448 | 560 | 672 |
| 0.0915 | 44.3 | 66.4 | 111 | 222 | 443 | 554 | 664 |
| 0.0920 | 43.8 | 65.7 | 110 | 219 | 438 | 548 | 657 |
| 0.0925 | 43.3 | 65.0 | 108 | 217 | 433 | 542 | 650 |
| 0.0930 | 42.9 | 64.3 | 107 | 214 | 429 | 536 | 643 |
| 0.0935 | 42.4 | 63.6 | 106 | 212 | 424 | 530 | 636 |
| 0.0940 | 42.0 | 63.0 | 105 | 210 | 420 | 525 | 630 |
| 0.0945 | 41.5 | 62.3 | 104 | 208 | 415 | 519 | 623 |
| 0.0950 | 41.1 | 61.6 | 103 | 205 | 411 | 514 | 616 |
| 0.0955 | 40.7 | 61.0 | 102 | 203 | 407 | 508 | 610 |
| 0.0960 | 40.2 | 60.4 | 101 | 201 | 402 | 503 | 604 |
| 0.0965 | 39.8 | 59.7 | 99.6 | 199 | 398 | 498 | 597 |
| 0.0970 | 39.4 | 59.1 | 98.5 | 197 | 394 | 493 | 591 |
| 0.0975 | 39.0 | 58.5 | 97.5 | 195 | 390 | 488 | 585 |
| 0.0980 | 38.6 | 57.9 | 96.5 | 193 | 386 | 483 | 579 |
| 0.0985 | 38.2 | 57.3 | 95.6 | 191 | 382 | 478 | 573 |
| 0.0990 | 37.8 | 56.8 | 94.6 | 189 | 378 | 473 | 568 |
| 0.0995 | 37.5 | 56.2 | 93.6 | 187 | 375 | 468 | 562 |
| 0.100 | 37.1 | 55.6 | 92.7 | 185 | 371 | 464 | 556 |
| 0.101 | 36.4 | 54.5 | 90.9 | 182 | 364 | 455 | 545 |
| 0.102 | 35.6 | 53.5 | 89.1 | 178 | 356 | 446 | 535 |
| 0.103 | 35.0 | 52.4 | 87.4 | 175 | 350 | 437 | 524 |
| 0.104 | 34.3 | 51.4 | 85.7 | 171 | 343 | 429 | 514 |
| 0.105 | 33.6 | 50.5 | 84.1 | 168 | 336 | 421 | 505 |
| 0.106 | 33.0 | 49.5 | 82.5 | 165 | 330 | 413 | 495 |
| 0.107 | 32.4 | 48.6 | 81.0 | 162 | 324 | 405 | 486 |
| 0.108 | 31.8 | 47.7 | 79.5 | 159 | 318 | 398 | 477 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.109 | 31.2 | 46.8 | 78.0 | 156 | 312 | 390 | 468 |
| 0.110 | 30.6 | 46.0 | 76.6 | 153 | 306 | 383 | 460 |
| 0.111 | 30.1 | 45.2 | 75.3 | 151 | 301 | 376 | 452 |
| 0.112 | 29.6 | 44.4 | 73.9 | 148 | 296 | 370 | 444 |
| 0.113 | 29.0 | 43.6 | 72.6 | 145 | 290 | 363 | 436 |
| 0.114 | 28.5 | 42.8 | 71.3 | 143 | 285 | 357 | 428 |
| 0.115 | 28.0 | 42.1 | 70.1 | 140 | 280 | 351 | 421 |
| 0.116 | 27.6 | 41.3 | 68.9 | 138 | 276 | 345 | 413 |
| 0.117 | 27.1 | 40.6 | 67.7 | 135 | 271 | 339 | 406 |
| 0.118 | 26.6 | 40.0 | 66.6 | 133 | 266 | 333 | 400 |
| 0.119 | 26.2 | 39.3 | 65.5 | 131 | 262 | 327 | 393 |
| 0.120 | 25.8 | 38.6 | 64.4 | 129 | 258 | 322 | 386 |
| 0.121 | 25.3 | 38.0 | 63.3 | 127 | 253 | 317 | 380 |
| 0.122 | 24.9 | 37.4 | 62.3 | 125 | 249 | 312 | 374 |
| 0.123 | 24.5 | 36.8 | 61.3 | 123 | 245 | 306 | 368 |
| 0.124 | 24.1 | 36.2 | 60.3 | 121 | 241 | 302 | 362 |
| 0.125 | 23.7 | 35.6 | 59.3 | 119 | 237 | 297 | 356 |
| 0.126 | 23.4 | 35.0 | 58.4 | 117 | 234 | 292 | 350 |
| 0.127 | 23.0 | 34.5 | 57.5 | 115 | 230 | 287 | 345 |
| 0.128 | 22.6 | 34.0 | 56.6 | 113 | 226 | 283 | 340 |
| 0.129 | 22.3 | 33.4 | 55.7 | 111 | 223 | 279 | 334 |
| 0.130 | 21.9 | 32.9 | 54.9 | 110 | 219 | 274 | 329 |
| 0.131 | 21.6 | 32.4 | 54.0 | 108 | 216 | 270 | 324 |
| 0.132 | 21.3 | 31.9 | 53.2 | 106 | 213 | 266 | 319 |
| 0.133 | 21.0 | 31.5 | 52.4 | 105 | 210 | 262 | 315 |
| 0.134 | 20.7 | 31.0 | 51.6 | 103 | 207 | 258 | 310 |
| 0.135 | 20.3 | 30.5 | 50.9 | 102 | 203 | 254 | 305 |
| 0.136 | 20.0 | 30.1 | 50.1 | 100 | 200 | 251 | 301 |
| 0.137 | 19.8 | 29.6 | 49.4 | 98.8 | 198 | 247 | 296 |
| 0.138 | 19.5 | 29.2 | 48.7 | 97.4 | 195 | 243 | 292 |
| 0.139 | 19.2 | 28.8 | 48.0 | 96.0 | 192 | 240 | 288 |
| 0.140 | 18.9 | 28.4 | 47.3 | 94.6 | 189 | 237 | 284 |
| 0.141 | 18.7 | 28.0 | 46.6 | 93.3 | 187 | 233 | 280 |
| 0.142 | 18.4 | 27.6 | 46.0 | 92.0 | 184 | 230 | 276 |
| 0.143 | 18.1 | 27.2 | 45.3 | 90.7 | 181 | 227 | 272 |
| 0.144 | 17.9 | 26.8 | 44.7 | 89.4 | 179 | 224 | 268 |
| 0.145 | 17.6 | 26.5 | 44.1 | 88.2 | 176 | 221 | 265 |
| 0.146 | 17.4 | 26.1 | 43.5 | 87.0 | 174 | 218 | 261 |
| 0.147 | 17.2 | 25.7 | 42.9 | 85.8 | 172 | 215 | 257 |
| 0.148 | 16.9 | 25.4 | 42.3 | 84.7 | 169 | 212 | 254 |
| 0.149 | 16.7 | 25.1 | 41.8 | 83.5 | 167 | 209 | 251 |
| 0.150 | 16.5 | 24.7 | 41.2 | 82.4 | 165 | 206 | 247 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.151 | 16.3 | 24.4 | 40.7 | 81.3 | 163 | 203 | 244 |
| 0.152 | 16.1 | 24.1 | 40.1 | 80.3 | 161 | 201 | 241 |
| 0.153 | 15.8 | 23.8 | 39.6 | 79.2 | 158 | 198 | 238 |
| 0.154 | 15.6 | 23.5 | 39.1 | 78.2 | 156 | 196 | 235 |
| 0.155 | 15.4 | 23.2 | 38.6 | 77.2 | 154 | 193 | 232 |
| 0.156 | 15.2 | 22.9 | 38.1 | 76.2 | 152 | 191 | 229 |
| 0.157 | 15.0 | 22.6 | 37.6 | 75.2 | 150 | 188 | 226 |
| 0.158 | 14.9 | 22.3 | 37.1 | 74.3 | 149 | 186 | 223 |
| 0.159 | 14.7 | 22.0 | 36.7 | 73.4 | 147 | 183 | 220 |
| 0.160 | 14.5 | 21.7 | 36.2 | 72.4 | 145 | 181 | 217 |
| 0.161 | 14.3 | 21.5 | 35.8 | 71.5 | 143 | 179 | 215 |
| 0.162 | 14.1 | 21.2 | 35.3 | 70.7 | 141 | 177 | 212 |
| 0.163 | 14.0 | 20.9 | 34.9 | 69.8 | 140 | 175 | 209 |
| 0.164 | 13.8 | 20.7 | 34.5 | 69.0 | 138 | 172 | 207 |
| 0.165 | 13.6 | 20.4 | 34.1 | 68.1 | 136 | 170 | 204 |
| 0.166 | 13.5 | 20.2 | 33.6 | 67.3 | 135 | 168 | 202 |
| 0.167 | 13.3 | 19.9 | 33.2 | 66.5 | 133 | 166 | 199 |
| 0.168 | 13.1 | 19.7 | 32.8 | 65.7 | 131 | 164 | 197 |
| 0.169 | 13.0 | 19.5 | 32.5 | 64.9 | 130 | 162 | 195 |
| 0.170 | 12.8 | 19.3 | 32.1 | 64.2 | 128 | 160 | 193 |
| 0.171 | 12.7 | 19.0 | 31.7 | 63.4 | 127 | 159 | 190 |
| 0.172 | 12.5 | 18.8 | 31.3 | 62.7 | 125 | 157 | 188 |
| 0.173 | 12.4 | 18.6 | 31.0 | 62.0 | 124 | 155 | 186 |
| 0.174 | 12.2 | 18.4 | 30.6 | 61.3 | 122 | 153 | 184 |
| 0.175 | 12.1 | 18.2 | 30.3 | 60.6 | 121 | 151 | 182 |
| 0.176 | 12.0 | 18.0 | 29.9 | 59.9 | 120 | 150 | 180 |
| 0.177 | 11.8 | 17.8 | 29.6 | 59.2 | 118 | 148 | 178 |
| 0.178 | 11.7 | 17.6 | 29.3 | 58.5 | 117 | 146 | 176 |
| 0.179 | 11.6 | 17.4 | 28.9 | 57.9 | 116 | 145 | 174 |
| 0.180 | 11.4 | 17.2 | 28.6 | 57.2 | 114 | 143 | 172 |
| 0.181 | 11.3 | 17.0 | 28.3 | 56.6 | 113 | 142 | 170 |
| 0.182 | 11.2 | 16.8 | 28.0 | 56.0 | 112 | 140 | 168 |
| 0.183 | 11.1 | 16.6 | 27.7 | 55.4 | 111 | 138 | 166 |
| 0.184 | 11.0 | 16.4 | 27.4 | 54.8 | 110 | 137 | 164 |
| 0.185 | 10.8 | 16.3 | 27.1 | 54.2 | 108 | 135 | 163 |
| 0.186 | 10.7 | 16.1 | 26.8 | 53.6 | 107 | 134 | 161 |
| 0.187 | 10.6 | 15.9 | 26.5 | 53.0 | 106 | 133 | 159 |
| 0.188 | 10.5 | 15.7 | 26.2 | 52.5 | 105 | 131 | 157 |
| 0.189 | 10.4 | 15.6 | 26.0 | 51.9 | 104 | 130 | 156 |
| 0.190 | 10.3 | 15.4 | 25.7 | 51.4 | 103 | 128 | 154 |
| 0.191 | 10.2 | 15.2 | 25.4 | 50.8 | 102 | 127 | 152 |
| 0.192 | 10.1 | 15.1 | 25.2 | 50.3 | 101 | 126 | 151 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.193 | 10.0 | 14.9 | 24.9 | 49.8 | 99.6 | 124 | 149 |
| 0.194 | 9.85 | 14.8 | 24.6 | 49.3 | 98.5 | 123 | 148 |
| 0.195 | 9.75 | 14.6 | 24.4 | 48.8 | 97.5 | 122 | 146 |
| 0.196 | 9.65 | 14.5 | 24.1 | 48.3 | 96.5 | 121 | 145 |
| 0.197 | 9.56 | 14.3 | 23.9 | 47.8 | 95.6 | 119 | 143 |
| 0.198 | 9.46 | 14.2 | 23.6 | 47.3 | 94.6 | 118 | 142 |
| 0.199 | 9.36 | 14.0 | 23.4 | 46.8 | 93.6 | 117 | 140 |
| 0.200 | 9.27 | 13.9 | 23.2 | 46.4 | 92.7 | 116 | 139 |
| 0.201 | 9.18 | 13.8 | 22.9 | 45.9 | 91.8 | 115 | 138 |
| 0.202 | 9.09 | 13.6 | 22.7 | 45.4 | 90.9 | 114 | 136 |
| 0.203 | 9.00 | 13.5 | 22.5 | 45.0 | 90.0 | 113 | 135 |
| 0.204 | 8.91 | 13.4 | 22.3 | 44.6 | 89.1 | 111 | 134 |
| 0.205 | 8.82 | 13.2 | 22.1 | 44.1 | 88.2 | 110 | 132 |
| 0.206 | 8.74 | 13.1 | 21.8 | 43.7 | 87.4 | 109 | 131 |
| 0.207 | 8.65 | 13.0 | 21.6 | 43.3 | 86.5 | 108 | 130 |
| 0.208 | 8.57 | 12.9 | 21.4 | 42.9 | 85.7 | 107 | 129 |
| 0.209 | 8.49 | 12.7 | 21.2 | 42.5 | 84.9 | 106 | 127 |
| 0.210 | 8.41 | 12.6 | 21.0 | 42.1 | 84.1 | 105 | 126 |
| 0.211 | 8.33 | 12.5 | 20.8 | 41.7 | 83.3 | 104 | 125 |
| 0.212 | 8.25 | 12.4 | 20.6 | 41.3 | 82.5 | 103 | 124 |
| 0.213 | 8.17 | 12.3 | 20.4 | 40.9 | 81.7 | 102 | 123 |
| 0.214 | 8.10 | 12.1 | 20.2 | 40.5 | 81.0 | 101 | 121 |
| 0.215 | 8.02 | 12.0 | 20.1 | 40.1 | 80.2 | 100 | 120 |
| 0.216 | 7.95 | 11.9 | 19.9 | 39.7 | 79.5 | 99.4 | 119 |
| 0.217 | 7.87 | 11.8 | 19.7 | 39.4 | 78.7 | 98.5 | 118 |
| 0.218 | 7.80 | 11.7 | 19.5 | 39.0 | 78.0 | 97.6 | 117 |
| 0.219 | 7.73 | 11.6 | 19.3 | 38.7 | 77.3 | 96.7 | 116 |
| 0.220 | 7.66 | 11.5 | 19.2 | 38.3 | 76.6 | 95.8 | 115 |
| 0.221 | 7.59 | 11.4 | 19.0 | 38.0 | 75.9 | 94.9 | 114 |
| 0.222 | 7.52 | 11.3 | 18.8 | 37.6 | 75.2 | 94.1 | 113 |
| 0.223 | 7.46 | 11.2 | 18.6 | 37.3 | 74.6 | 93.2 | 112 |
| 0.224 | 7.39 | 11.1 | 18.5 | 37.0 | 73.9 | 92.4 | 111 |
| 0.225 | 7.32 | 11.0 | 18.3 | 36.6 | 73.2 | 91.6 | 110 |
| 0.226 | 7.26 | 10.9 | 18.2 | 36.3 | 72.6 | 90.8 | 109 |
| 0.227 | 7.20 | 10.8 | 18.0 | 36.0 | 72.0 | 90.0 | 108 |
| 0.228 | 7.13 | 10.7 | 17.8 | 35.7 | 71.3 | 89.2 | 107 |
| 0.229 | 7.07 | 10.6 | 17.7 | 35.4 | 70.7 | 88.4 | 106 |
| 0.230 | 7.01 | 10.5 | 17.5 | 35.1 | 70.1 | 87.7 | 105 |
| 0.231 | 6.95 | 10.4 | 17.4 | 34.8 | 69.5 | 86.9 | 104 |
| 0.232 | 6.89 | 10.3 | 17.2 | 34.5 | 68.9 | 86.1 | 103 |
| 0.233 | 6.83 | 10.2 | 17.1 | 34.2 | 68.3 | 85.4 | 102 |
| 0.234 | 6.77 | 10.2 | 16.9 | 33.9 | 67.7 | 84.7 | 102 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.235 | 6.71 | 10.1 | 16.8 | 33.6 | 67.1 | 84.0 | 101 |
| 0.236 | 6.66 | 9.99 | 16.6 | 33.3 | 66.6 | 83.3 | 99.9 |
| 0.237 | 6.60 | 9.90 | 16.5 | 33.0 | 66.0 | 82.5 | 99.0 |
| 0.238 | 6.55 | 9.82 | 16.4 | 32.7 | 65.5 | 81.9 | 98.2 |
| 0.239 | 6.49 | 9.74 | 16.2 | 32.5 | 64.9 | 81.2 | 97.4 |
| 0.240 | 6.44 | 9.66 | 16.1 | 32.2 | 64.4 | 80.5 | 96.6 |
| 0.241 | 6.38 | 9.58 | 16.0 | 31.9 | 63.8 | 79.8 | 95.8 |
| 0.242 | 6.33 | 9.50 | 15.8 | 31.7 | 63.3 | 79.2 | 95.0 |
| 0.243 | 6.28 | 9.42 | 15.7 | 31.4 | 62.8 | 78.5 | 94.2 |
| 0.244 | 6.23 | 9.34 | 15.6 | 31.1 | 62.3 | 77.9 | 93.4 |
| 0.245 | 6.18 | 9.27 | 15.4 | 30.9 | 61.8 | 77.2 | 92.7 |
| 0.246 | 6.13 | 9.19 | 15.3 | 30.6 | 61.3 | 76.6 | 91.9 |
| 0.247 | 6.08 | 9.12 | 15.2 | 30.4 | 60.8 | 76.0 | 91.2 |
| 0.248 | 6.03 | 9.05 | 15.1 | 30.2 | 60.3 | 75.4 | 90.5 |
| 0.249 | 5.98 | 8.97 | 15.0 | 29.9 | 59.8 | 74.8 | 89.7 |
| 0.250 | 5.93 | 8.90 | 14.8 | 29.7 | 59.3 | 74.2 | 89.0 |
| 0.251 | 5.89 | 8.83 | 14.7 | 29.4 | 58.9 | 73.6 | 88.3 |
| 0.252 | 5.84 | 8.76 | 14.6 | 29.2 | 58.4 | 73.0 | 87.6 |
| 0.253 | 5.79 | 8.69 | 14.5 | 29.0 | 57.9 | 72.4 | 86.9 |
| 0.254 | 5.75 | 8.62 | 14.4 | 28.7 | 57.5 | 71.9 | 86.2 |
| 0.255 | 5.70 | 8.56 | 14.3 | 28.5 | 57.0 | 71.3 | 85.6 |
| 0.256 | 5.66 | 8.49 | 14.1 | 28.3 | 56.6 | 70.8 | 84.9 |
| 0.257 | 5.61 | 8.42 | 14.0 | 28.1 | 56.1 | 70.2 | 84.2 |
| 0.258 | 5.57 | 8.36 | 13.9 | 27.9 | 55.7 | 69.7 | 83.6 |
| 0.259 | 5.53 | 8.29 | 13.8 | 27.6 | 55.3 | 69.1 | 82.9 |
| 0.260 | 5.49 | 8.23 | 13.7 | 27.4 | 54.9 | 68.6 | 82.3 |
| 0.261 | 5.44 | 8.17 | 13.6 | 27.2 | 54.4 | 68.1 | 81.7 |
| 0.262 | 5.40 | 8.10 | 13.5 | 27.0 | 54.0 | 67.5 | 81.0 |
| 0.263 | 5.36 | 8.04 | 13.4 | 26.8 | 53.6 | 67.0 | 80.4 |
| 0.264 | 5.32 | 7.98 | 13.3 | 26.6 | 53.2 | 66.5 | 79.8 |
| 0.265 | 5.28 | 7.92 | 13.2 | 26.4 | 52.8 | 66.0 | 79.2 |
| 0.266 | 5.24 | 7.86 | 13.1 | 26.2 | 52.4 | 65.5 | 78.6 |
| 0.267 | 5.20 | 7.80 | 13.0 | 26.0 | 52.0 | 65.0 | 78.0 |
| 0.268 | 5.16 | 7.75 | 12.9 | 25.8 | 51.6 | 64.6 | 77.5 |
| 0.269 | 5.12 | 7.69 | 12.8 | 25.6 | 51.2 | 64.1 | 76.9 |
| 0.270 | 5.09 | 7.63 | 12.7 | 25.4 | 50.9 | 63.6 | 76.3 |
| 0.271 | 5.05 | 7.58 | 12.6 | 25.3 | 50.5 | 63.1 | 75.8 |
| 0.272 | 5.01 | 7.52 | 12.5 | 25.1 | 50.1 | 62.7 | 75.2 |
| 0.273 | 4.98 | 7.46 | 12.4 | 24.9 | 49.8 | 62.2 | 74.6 |
| 0.274 | 4.94 | 7.41 | 12.3 | 24.7 | 49.4 | 61.8 | 74.1 |
| 0.275 | 4.90 | 7.36 | 12.3 | 24.5 | 49.0 | 61.3 | 73.6 |
| 0.276 | — | 7.30 | 12.2 | 24.3 | 48.7 | 60.9 | 73.0 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.277 | — | 7.25 | 12.1 | 24.2 | 48.3 | 60.4 | 72.5 |
| 0.278 | — | 7.20 | 12.0 | 24.0 | 48.0 | 60.0 | 72.0 |
| 0.279 | — | 7.15 | 11.9 | 23.8 | 47.6 | 59.6 | 71.5 |
| 0.280 | — | 7.10 | 11.8 | 23.7 | 47.3 | 59.1 | 71.0 |
| 0.281 | — | 7.05 | 11.7 | 23.5 | 47.0 | 58.7 | 70.5 |
| 0.282 | — | 7.00 | 11.7 | 23.3 | 46.6 | 58.3 | 70.0 |
| 0.283 | — | 6.95 | 11.6 | 23.2 | 46.3 | 57.9 | 69.5 |
| 0.284 | — | 6.90 | 11.5 | 23.0 | 46.0 | 57.5 | 69.0 |
| 0.285 | — | 6.85 | 11.4 | 22.8 | 45.7 | 57.1 | 68.5 |
| 0.286 | — | 6.80 | 11.3 | 22.7 | 45.3 | 56.7 | 68.0 |
| 0.287 | — | 6.75 | 11.3 | 22.5 | 45.0 | 56.3 | 67.5 |
| 0.288 | — | 6.71 | 11.2 | 22.4 | 44.7 | 55.9 | 67.1 |
| 0.289 | — | 6.66 | 11.1 | 22.2 | 44.4 | 55.5 | 66.6 |
| 0.290 | — | 6.62 | 11.0 | 22.1 | 44.1 | 55.1 | 66.2 |
| 0.291 | — | 6.57 | 10.9 | 21.9 | 43.8 | 54.8 | 65.7 |
| 0.292 | — | 6.52 | 10.9 | 21.8 | 43.5 | 54.4 | 65.2 |
| 0.293 | — | 6.48 | 10.8 | 21.6 | 43.2 | 54.0 | 64.8 |
| 0.294 | — | 6.44 | 10.7 | 21.5 | 42.9 | 53.6 | 64.4 |
| 0.295 | — | 6.39 | 10.7 | 21.3 | 42.6 | 53.3 | 63.9 |
| 0.296 | — | 6.35 | 10.6 | 21.2 | 42.3 | 52.9 | 63.5 |
| 0.297 | — | 6.31 | 10.5 | 21.0 | 42.0 | 52.6 | 63.1 |
| 0.298 | — | 6.26 | 10.4 | 20.9 | 41.8 | 52.2 | 62.6 |
| 0.299 | — | 6.22 | 10.4 | 20.7 | 41.5 | 51.9 | 62.2 |
| 0.300 | — | 6.18 | 10.3 | 20.6 | 41.2 | 51.5 | 61.8 |
| 0.301 | — | 6.14 | 10.2 | 20.5 | 40.9 | 51.2 | 61.4 |
| 0.302 | — | 6.10 | 10.2 | 20.3 | 40.7 | 50.8 | 61.0 |
| 0.303 | — | 6.06 | 10.1 | 20.2 | 40.4 | 50.5 | 60.6 |
| 0.304 | — | 6.02 | 10.0 | 20.1 | 40.1 | 50.2 | 60.2 |
| 0.305 | — | 5.98 | 9.97 | 19.9 | 39.9 | 49.8 | 59.8 |
| 0.306 | — | 5.94 | 9.90 | 19.8 | 39.6 | 49.5 | 59.4 |
| 0.307 | — | 5.90 | 9.84 | 19.7 | 39.3 | 49.2 | 59.0 |
| 0.308 | — | 5.86 | 9.77 | 19.5 | 39.1 | 48.9 | 58.6 |
| 0.309 | — | 5.83 | 9.71 | 19.4 | 38.8 | 48.6 | 58.3 |
| 0.310 | — | 5.79 | 9.65 | 19.3 | 38.6 | 48.2 | 57.9 |
| 0.311 | — | 5.75 | 9.59 | 19.2 | 38.3 | 47.9 | 57.5 |
| 0.312 | — | 5.72 | 9.52 | 19.1 | 38.1 | 47.6 | 57.2 |
| 0.313 | — | 5.68 | 9.46 | 18.9 | 37.9 | 47.3 | 56.8 |
| 0.314 | — | 5.64 | 9.40 | 18.8 | 37.6 | 47.0 | 56.4 |
| 0.315 | — | 5.61 | 9.34 | 18.7 | 37.4 | 46.7 | 56.1 |
| 0.316 | — | 5.57 | 9.28 | 18.6 | 37.1 | 46.4 | 55.7 |
| 0.317 | — | 5.54 | 9.23 | 18.5 | 36.9 | 46.1 | 55.4 |
| 0.318 | — | 5.50 | 9.17 | 18.3 | 36.7 | 45.9 | 55.0 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.319 | — | 5.47 | 9.11 | 18.2 | 36.4 | 45.6 | 54.7 |
| 0.320 | — | 5.43 | 9.05 | 18.1 | 36.2 | 45.3 | 54.3 |
| 0.321 | — | 5.40 | 9.00 | 18.0 | 36.0 | 45.0 | 54.0 |
| 0.322 | — | 5.37 | 8.94 | 17.9 | 35.8 | 44.7 | 53.7 |
| 0.323 | — | 5.33 | 8.89 | 17.8 | 35.5 | 44.4 | 53.3 |
| 0.324 | — | 5.30 | 8.83 | 17.7 | 35.3 | 44.2 | 53.0 |
| 0.325 | — | 5.27 | 8.78 | 17.6 | 35.1 | 43.9 | 52.7 |
| 0.326 | — | 5.23 | 8.72 | 17.4 | 34.9 | 43.6 | 52.3 |
| 0.327 | — | 5.20 | 8.67 | 17.3 | 34.7 | 43.4 | 52.0 |
| 0.328 | — | 5.17 | 8.62 | 17.2 | 34.5 | 43.1 | 51.7 |
| 0.329 | — | 5.14 | 8.57 | 17.1 | 34.3 | 42.8 | 51.4 |
| 0.330 | — | 5.11 | 8.51 | 17.0 | 34.1 | 42.6 | 51.1 |
| 0.331 | — | 5.08 | 8.46 | 16.9 | 33.8 | 42.3 | 50.8 |
| 0.332 | — | 5.05 | 8.41 | 16.8 | 33.6 | 42.1 | 50.5 |
| 0.333 | — | 5.02 | 8.36 | 16.7 | 33.4 | 41.8 | 50.2 |
| 0.334 | — | 4.99 | 8.31 | 16.6 | 33.2 | 41.6 | 49.9 |
| 0.335 | — | 4.96 | 8.26 | 16.5 | 33.0 | 41.3 | 49.6 |
| 0.336 | — | 4.93 | 8.21 | 16.4 | 32.8 | 41.1 | 49.3 |
| 0.337 | — | 4.90 | 8.16 | 16.3 | 32.7 | 40.8 | 49.0 |
| 0.338 | — | — | 8.12 | 16.2 | 32.5 | 40.6 | 48.7 |
| 0.339 | — | — | 8.07 | 16.1 | 32.3 | 40.3 | 48.4 |
| 0.340 | — | — | 8.02 | 16.0 | 32.1 | 40.1 | 48.1 |
| 0.341 | — | — | 7.97 | 15.9 | 31.9 | 39.9 | 47.8 |
| 0.342 | — | — | 7.93 | 15.9 | 31.7 | 39.6 | 47.6 |
| 0.343 | — | — | 7.88 | 15.8 | 31.5 | 39.4 | 47.3 |
| 0.344 | — | — | 7.83 | 15.7 | 31.3 | 39.2 | 47.0 |
| 0.345 | — | — | 7.79 | 15.6 | 31.2 | 39.0 | 46.7 |
| 0.346 | — | — | 7.74 | 15.5 | 31.0 | 38.7 | 46.5 |
| 0.347 | — | — | 7.70 | 15.4 | 30.8 | 38.5 | 46.2 |
| 0.348 | — | — | 7.66 | 15.3 | 30.6 | 38.3 | 45.9 |
| 0.349 | — | — | 7.61 | 15.2 | 30.4 | 38.1 | 45.7 |
| 0.350 | — | — | 7.57 | 15.1 | 30.3 | 37.9 | 45.4 |
| 0.351 | — | — | 7.53 | 15.1 | 30.1 | 37.6 | 45.2 |
| 0.352 | — | — | 7.48 | 15.0 | 29.9 | 37.4 | 44.9 |
| 0.353 | — | — | 7.44 | 14.9 | 29.8 | 37.2 | 44.6 |
| 0.354 | — | — | 7.40 | 14.8 | 29.6 | 37.0 | 44.4 |
| 0.355 | — | — | 7.36 | 14.7 | 29.4 | 36.8 | 44.1 |
| 0.356 | — | — | 7.32 | 14.6 | 29.3 | 36.6 | 43.9 |
| 0.357 | — | — | 7.27 | 14.6 | 29.1 | 36.4 | 43.7 |
| 0.358 | — | — | 7.23 | 14.5 | 28.9 | 36.2 | 43.4 |
| 0.359 | — | — | 7.19 | 14.4 | 28.8 | 36.0 | 43.2 |
| 0.360 | — | — | 7.15 | 14.3 | 28.6 | 35.8 | 42.9 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.361 | — | — | 7.11 | 14.2 | 28.5 | 35.6 | 42.7 |
| 0.362 | — | — | 7.08 | 14.2 | 28.3 | 35.4 | 42.5 |
| 0.363 | — | — | 7.04 | 14.1 | 28.1 | 35.2 | 42.2 |
| 0.364 | — | — | 7.00 | 14.0 | 28.0 | 35.0 | 42.0 |
| 0.365 | — | — | 6.96 | 13.9 | 27.8 | 34.8 | 41.8 |
| 0.366 | — | — | 6.92 | 13.8 | 27.7 | 34.6 | 41.5 |
| 0.367 | — | — | 6.88 | 13.8 | 27.5 | 34.4 | 41.3 |
| 0.368 | — | — | 6.85 | 13.7 | 27.4 | 34.2 | 41.1 |
| 0.369 | — | — | 6.81 | 13.6 | 27.2 | 34.1 | 40.9 |
| 0.370 | — | — | 6.77 | 13.5 | 27.1 | 33.9 | 40.6 |
| 0.371 | — | — | 6.74 | 13.5 | 26.9 | 33.7 | 40.4 |
| 0.372 | — | — | 6.70 | 13.4 | 26.8 | 33.5 | 40.2 |
| 0.373 | — | — | 6.66 | 13.3 | 26.7 | 33.3 | 40.0 |
| 0.374 | — | — | 6.63 | 13.3 | 26.5 | 33.1 | 39.8 |
| 0.375 | — | — | 6.59 | 13.2 | 26.4 | 33.0 | 39.6 |
| 0.376 | — | — | 6.56 | 13.1 | 26.2 | 32.8 | 39.4 |
| 0.377 | — | — | 6.52 | 13.0 | 26.1 | 32.6 | 39.1 |
| 0.378 | — | — | 6.49 | 13.0 | 26.0 | 32.5 | 38.9 |
| 0.379 | — | — | 6.45 | 12.9 | 25.8 | 32.3 | 38.7 |
| 0.380 | — | — | 6.42 | 12.8 | 25.7 | 32.1 | 38.5 |
| 0.381 | — | — | 6.39 | 12.8 | 25.5 | 31.9 | 38.3 |
| 0.382 | — | — | 6.35 | 12.7 | 25.4 | 31.8 | 38.1 |
| 0.383 | — | — | 6.32 | 12.6 | 25.3 | 31.6 | 37.9 |
| 0.384 | — | — | 6.29 | 12.6 | 25.1 | 31.4 | 37.7 |
| 0.385 | — | — | 6.26 | 12.5 | 25.0 | 31.3 | 37.5 |
| 0.386 | — | — | 6.22 | 12.4 | 24.9 | 31.1 | 37.3 |
| 0.387 | — | — | 6.19 | 12.4 | 24.8 | 31.0 | 37.1 |
| 0.388 | — | — | 6.16 | 12.3 | 24.6 | 30.8 | 37.0 |
| 0.389 | — | — | 6.13 | 12.3 | 24.5 | 30.6 | 36.8 |
| 0.390 | — | — | 6.10 | 12.2 | 24.4 | 30.5 | 36.6 |
| 0.391 | — | — | 6.06 | 12.1 | 24.3 | 30.3 | 36.4 |
| 0.392 | — | — | 6.03 | 12.1 | 24.1 | 30.2 | 36.2 |
| 0.393 | — | — | 6.00 | 12.0 | 24.0 | 30.0 | 36.0 |
| 0.394 | — | — | 5.97 | 11.9 | 23.9 | 29.9 | 35.8 |
| 0.395 | — | — | 5.94 | 11.9 | 23.8 | 29.7 | 35.7 |
| 0.396 | — | — | 5.91 | 11.8 | 23.6 | 29.6 | 35.5 |
| 0.397 | — | — | 5.88 | 11.8 | 23.5 | 29.4 | 35.3 |
| 0.398 | — | — | 5.85 | 11.7 | 23.4 | 29.3 | 35.1 |
| 0.399 | — | — | 5.82 | 11.6 | 23.3 | 29.1 | 34.9 |
| 0.400 | — | — | 5.79 | 11.6 | 23.2 | 29.0 | 34.8 |
| 0.401 | — | — | 5.77 | 11.5 | 23.1 | 28.8 | 34.6 |
| 0.402 | — | — | 5.74 | 11.5 | 22.9 | 28.7 | 34.4 |
| 0.403 | — | — | 5.71 | 11.4 | 22.8 | 28.5 | 34.3 |
| 0.404 | — | — | 5.68 | 11.4 | 22.7 | 28.4 | 34.1 |
| 0.405 | — | — | 5.65 | 11.3 | 22.6 | 28.3 | 33.9 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.406 | — | — | 5.62 | 11.3 | 22.5 | 28.1 | 33.8 |
| 0.407 | — | — | 5.60 | 11.2 | 22.4 | 28.0 | 33.6 |
| 0.408 | — | — | 5.57 | 11.1 | 22.3 | 27.9 | 33.4 |
| 0.409 | — | — | 5.54 | 11.1 | 22.2 | 27.7 | 33.3 |
| 0.410 | — | — | 5.52 | 11.0 | 22.1 | 27.6 | 33.1 |
| 0.411 | — | — | 5.49 | 11.0 | 22.0 | 27.4 | 32.9 |
| 0.412 | — | — | 5.46 | 10.9 | 21.8 | 27.3 | 32.8 |
| 0.413 | — | — | 5.44 | 10.9 | 21.7 | 27.2 | 32.6 |
| 0.414 | — | — | 5.41 | 10.8 | 21.6 | 27.1 | 32.5 |
| 0.415 | — | — | 5.38 | 10.8 | 21.5 | 26.9 | 32.3 |
| 0.416 | — | — | 5.36 | 10.7 | 21.4 | 26.8 | 32.1 |
| 0.417 | — | — | 5.33 | 10.7 | 21.3 | 26.7 | 32.0 |
| 0.418 | — | — | 5.31 | 10.6 | 21.2 | 26.5 | 31.8 |
| 0.419 | — | — | 5.28 | 10.6 | 21.1 | 26.4 | 31.7 |
| 0.420 | — | — | 5.26 | 10.5 | 21.0 | 26.3 | 31.5 |
| 0.421 | — | — | 5.23 | 10.5 | 20.9 | 26.2 | 31.4 |
| 0.422 | — | — | 5.21 | 10.4 | 20.8 | 26.0 | 31.2 |
| 0.423 | — | — | 5.18 | 10.4 | 20.7 | 25.9 | 31.1 |
| 0.424 | — | — | 5.16 | 10.3 | 20.6 | 25.8 | 30.9 |
| 0.425 | — | — | 5.13 | 10.3 | 20.5 | 25.7 | 30.8 |
| 0.426 | — | — | 5.11 | 10.2 | 20.4 | 25.6 | 30.7 |
| 0.427 | — | — | 5.09 | 10.2 | 20.3 | 25.4 | 30.5 |
| 0.428 | — | — | 5.06 | 10.1 | 20.2 | 25.3 | 30.4 |
| 0.429 | — | — | 5.04 | 10.1 | 20.1 | 25.2 | 30.2 |
| 0.430 | — | — | 5.01 | 10.0 | 20.1 | 25.1 | 30.1 |
| 0.431 | — | — | 4.99 | 9.98 | 20.0 | 25.0 | 29.9 |
| 0.432 | — | — | 4.97 | 9.94 | 19.9 | 24.8 | 29.8 |
| 0.433 | — | — | 4.95 | 9.89 | 19.8 | 24.7 | 29.7 |
| 0.434 | — | — | 4.92 | 9.85 | 19.7 | 24.6 | 29.5 |
| 0.435 | — | — | 4.90 | 9.80 | 19.6 | 24.5 | 29.4 |
| 0.436 | — | — | — | 9.76 | 19.5 | 24.4 | 29.3 |
| 0.437 | — | — | — | 9.71 | 19.4 | 24.3 | 29.1 |
| 0.438 | — | — | — | 9.67 | 19.3 | 24.2 | 29.0 |
| 0.439 | — | — | — | 9.62 | 19.2 | 24.1 | 28.9 |
| 0.440 | — | — | — | 9.58 | 19.2 | 24.0 | 28.7 |
| 0.441 | — | — | — | 9.54 | 19.1 | 23.8 | 28.6 |
| 0.442 | — | — | — | 9.49 | 19.0 | 23.7 | 28.5 |
| 0.443 | — | — | — | 9.45 | 18.9 | 23.6 | 28.3 |
| 0.444 | — | — | — | 9.41 | 18.8 | 23.5 | 28.2 |
| 0.445 | — | — | — | 9.36 | 18.7 | 23.4 | 28.1 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.446 | — | — | — | 9.32 | 18.6 | 23.3 | 28.0 |
| 0.447 | — | — | — | 9.28 | 18.6 | 23.2 | 27.8 |
| 0.448 | — | — | — | 9.24 | 18.5 | 23.1 | 27.7 |
| 0.449 | — | — | — | 9.20 | 18.4 | 23.0 | 27.6 |
| 0.450 | — | — | — | 9.16 | 18.3 | 22.9 | 27.5 |
| 0.451 | — | — | — | 9.12 | 18.2 | 22.8 | 27.4 |
| 0.452 | — | — | — | 9.08 | 18.2 | 22.7 | 27.2 |
| 0.453 | — | — | — | 9.04 | 18.1 | 22.6 | 27.1 |
| 0.454 | — | — | — | 9.00 | 18.0 | 22.5 | 27.0 |
| 0.455 | — | — | — | 8.96 | 17.9 | 22.4 | 26.9 |
| 0.456 | — | — | — | 8.92 | 17.8 | 22.3 | 26.8 |
| 0.457 | — | — | — | 8.88 | 17.8 | 22.2 | 26.6 |
| 0.458 | — | — | — | 8.84 | 17.7 | 22.1 | 26.5 |
| 0.459 | — | — | — | 8.80 | 17.6 | 22.0 | 26.4 |
| 0.460 | — | — | — | 8.76 | 17.5 | 21.9 | 26.3 |
| 0.461 | — | — | — | 8.73 | 17.4 | 21.8 | 26.2 |
| 0.462 | — | — | — | 8.69 | 17.4 | 21.7 | 26.1 |
| 0.463 | — | — | — | 8.65 | 17.3 | 21.6 | 26.0 |
| 0.464 | — | — | — | 8.61 | 17.2 | 21.5 | 25.8 |
| 0.465 | — | — | — | 8.58 | 17.1 | 21.4 | 25.7 |
| 0.466 | — | — | — | 8.54 | 17.1 | 21.4 | 25.6 |
| 0.467 | — | — | — | 8.50 | 17.0 | 21.3 | 25.5 |
| 0.468 | — | — | — | 8.47 | 16.9 | 21.2 | 25.4 |
| 0.469 | — | — | — | 8.43 | 16.9 | 21.1 | 25.3 |
| 0.470 | — | — | — | 8.40 | 16.8 | 21.0 | 25.2 |
| 0.471 | — | — | — | 8.36 | 16.7 | 20.9 | 25.1 |
| 0.472 | — | — | — | 8.32 | 16.6 | 20.8 | 25.0 |
| 0.473 | — | — | — | 8.29 | 16.6 | 20.7 | 24.9 |
| 0.474 | — | — | — | 8.25 | 16.5 | 20.6 | 24.8 |
| 0.475 | — | — | — | 8.22 | 16.4 | 20.6 | 24.7 |
| 0.476 | — | — | — | 8.18 | 16.4 | 20.5 | 24.6 |
| 0.477 | — | — | — | 8.15 | 16.3 | 20.4 | 24.5 |
| 0.478 | — | — | — | 8.12 | 16.2 | 20.3 | 24.3 |
| 0.479 | — | — | — | 8.08 | 16.2 | 20.2 | 24.2 |
| 0.480 | — | — | — | 8.05 | 16.1 | 20.1 | 24.1 |
| 0.481 | — | — | — | 8.02 | 16.0 | 20.0 | 24.0 |
| 0.482 | — | — | — | 7.98 | 16.0 | 20.0 | 23.9 |
| 0.483 | — | — | — | 7.95 | 15.9 | 19.9 | 23.8 |
| 0.484 | — | — | — | 7.92 | 15.8 | 19.8 | 23.7 |
| 0.485 | — | — | — | 7.88 | 15.8 | 19.7 | 23.7 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.486 | — | — | — | 7.85 | 15.7 | 19.6 | 23.6 |
| 0.487 | — | — | — | 7.82 | 15.6 | 19.6 | 23.5 |
| 0.488 | — | — | — | 7.79 | 15.6 | 19.5 | 23.4 |
| 0.489 | — | — | — | 7.76 | 15.5 | 19.4 | 23.3 |
| 0.490 | — | — | — | 7.72 | 15.4 | 19.3 | 23.2 |
| 0.491 | — | — | — | 7.69 | 15.4 | 19.2 | 23.1 |
| 0.492 | — | — | — | 7.66 | 15.3 | 19.2 | 23.0 |
| 0.493 | — | — | — | 7.63 | 15.3 | 19.1 | 22.9 |
| 0.494 | — | — | — | 7.60 | 15.2 | 19.0 | 22.8 |
| 0.495 | — | — | — | 7.57 | 15.1 | 18.9 | 22.7 |
| 0.496 | — | — | — | 7.54 | 15.1 | 18.8 | 22.6 |
| 0.497 | — | — | — | 7.51 | 15.0 | 18.8 | 22.5 |
| 0.498 | — | — | — | 7.48 | 15.0 | 18.7 | 22.4 |
| 0.499 | — | — | — | 7.45 | 14.9 | 18.6 | 22.3 |
| 0.500 | — | — | — | 7.42 | 14.8 | 18.5 | 22.3 |
| 0.501 | — | — | — | 7.39 | 14.8 | 18.5 | 22.2 |
| 0.502 | — | — | — | 7.36 | 14.7 | 18.4 | 22.1 |
| 0.503 | — | — | — | 7.33 | 14.7 | 18.3 | 22.0 |
| 0.504 | — | — | — | 7.30 | 14.6 | 18.3 | 21.9 |
| 0.505 | — | — | — | 7.27 | 14.5 | 18.2 | 21.8 |
| 0.506 | — | — | — | 7.24 | 14.5 | 18.1 | 21.7 |
| 0.507 | — | — | — | 7.21 | 14.4 | 18.0 | 21.6 |
| 0.508 | — | — | — | 7.19 | 14.4 | 18.0 | 21.6 |
| 0.509 | — | — | — | 7.16 | 14.3 | 17.9 | 21.5 |
| 0.510 | — | — | — | 7.13 | 14.3 | 17.8 | 21.4 |
| 0.511 | — | — | — | 7.10 | 14.2 | 17.8 | 21.3 |
| 0.512 | — | — | — | 7.07 | 14.1 | 17.7 | 21.2 |
| 0.513 | — | — | — | 7.05 | 14.1 | 17.6 | 21.1 |
| 0.514 | — | — | — | 7.02 | 14.0 | 17.6 | 21.1 |
| 0.515 | — | — | — | 6.99 | 14.0 | 17.5 | 21.0 |
| 0.516 | — | — | — | 6.97 | 13.9 | 17.4 | 20.9 |
| 0.517 | — | — | — | 6.94 | 13.9 | 17.3 | 20.8 |
| 0.518 | — | — | — | 6.91 | 13.8 | 17.3 | 20.7 |
| 0.519 | — | — | — | 6.88 | 13.8 | 17.2 | 20.7 |
| 0.520 | — | — | — | 6.86 | 13.7 | 17.1 | 20.6 |
| 0.521 | — | — | — | 6.83 | 13.7 | 17.1 | 20.5 |
| 0.522 | — | — | — | 6.81 | 13.6 | 17.0 | 20.4 |
| 0.523 | — | — | — | 6.78 | 13.6 | 17.0 | 20.3 |
| 0.524 | — | — | — | 6.75 | 13.5 | 16.9 | 20.3 |
| 0.525 | — | — | — | 6.73 | 13.5 | 16.8 | 20.2 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.526 | — | — | — | 6.70 | 13.4 | 16.8 | 20.1 |
| 0.527 | — | — | — | 6.68 | 13.4 | 16.7 | 20.0 |
| 0.528 | — | — | — | 6.65 | 13.3 | 16.6 | 20.0 |
| 0.529 | — | — | — | 6.63 | 13.3 | 16.6 | 19.9 |
| 0.530 | — | — | — | 6.60 | 13.2 | 16.5 | 19.8 |
| 0.531 | — | — | — | 6.58 | 13.2 | 16.4 | 19.7 |
| 0.532 | — | — | — | 6.55 | 13.1 | 16.4 | 19.7 |
| 0.533 | — | — | — | 6.53 | 13.1 | 16.3 | 19.6 |
| 0.534 | — | — | — | 6.50 | 13.0 | 16.3 | 19.5 |
| 0.535 | — | — | — | 6.48 | 13.0 | 16.2 | 19.4 |
| 0.536 | — | — | — | 6.46 | 12.9 | 16.1 | 19.4 |
| 0.537 | — | — | — | 6.43 | 12.9 | 16.1 | 19.3 |
| 0.538 | — | — | — | 6.41 | 12.8 | 16.0 | 19.2 |
| 0.539 | — | — | — | 6.38 | 12.8 | 16.0 | 19.1 |
| 0.540 | — | — | — | 6.36 | 12.7 | 15.9 | 19.1 |
| 0.541 | — | — | — | 6.34 | 12.7 | 15.8 | 19.0 |
| 0.542 | — | — | — | 6.31 | 12.6 | 15.8 | 18.9 |
| 0.543 | — | — | — | 6.29 | 12.6 | 15.7 | 18.9 |
| 0.544 | — | — | — | 6.27 | 12.5 | 15.7 | 18.8 |
| 0.545 | — | — | — | 6.24 | 12.5 | 15.6 | 18.7 |
| 0.546 | — | — | — | 6.22 | 12.4 | 15.6 | 18.7 |
| 0.547 | — | — | — | 6.20 | 12.4 | 15.5 | 18.6 |
| 0.548 | — | — | — | 6.18 | 12.3 | 15.4 | 18.5 |
| 0.549 | — | — | — | 6.15 | 12.3 | 15.4 | 18.5 |
| 0.550 | — | — | — | 6.13 | 12.3 | 15.3 | 18.4 |
| 0.551 | — | — | — | 6.11 | 12.2 | 15.3 | 18.3 |
| 0.552 | — | — | — | 6.09 | 12.2 | 15.2 | 18.3 |
| 0.553 | — | — | — | 6.06 | 12.1 | 15.2 | 18.2 |
| 0.554 | — | — | — | 6.04 | 12.1 | 15.1 | 18.1 |
| 0.555 | — | — | — | 6.02 | 12.0 | 15.1 | 18.1 |
| 0.556 | — | — | — | 6.00 | 12.0 | 15.0 | 18.0 |
| 0.557 | — | — | — | 5.98 | 12.0 | 14.9 | 17.9 |
| 0.558 | — | — | — | 5.96 | 11.9 | 14.9 | 17.9 |
| 0.559 | — | — | — | 5.93 | 11.9 | 14.8 | 17.8 |
| 0.560 | — | — | — | 5.91 | 11.8 | 14.8 | 17.7 |
| 0.561 | — | — | — | 5.89 | 11.8 | 14.7 | 17.7 |
| 0.562 | — | — | — | 5.87 | 11.7 | 14.7 | 17.6 |
| 0.563 | — | — | — | 5.85 | 11.7 | 14.6 | 17.6 |
| 0.564 | — | — | — | 5.83 | 11.7 | 14.6 | 17.5 |
| 0.565 | — | — | — | 5.81 | 11.6 | 14.5 | 17.4 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.566 | — | — | — | 5.79 | 11.6 | 14.5 | 17.4 |
| 0.567 | — | — | — | 5.77 | 11.5 | 14.4 | 17.3 |
| 0.568 | — | — | — | 5.75 | 11.5 | 14.4 | 17.2 |
| 0.569 | — | — | — | 5.73 | 11.5 | 14.3 | 17.2 |
| 0.570 | — | — | — | 5.71 | 11.4 | 14.3 | 17.1 |
| 0.571 | — | — | — | 5.69 | 11.4 | 14.2 | 17.1 |
| 0.572 | — | — | — | 5.67 | 11.3 | 14.2 | 17.0 |
| 0.573 | — | — | — | 5.65 | 11.3 | 14.1 | 16.9 |
| 0.574 | — | — | — | 5.63 | 11.3 | 14.1 | 16.9 |
| 0.575 | — | — | — | 5.61 | 11.2 | 14.0 | 16.8 |
| 0.576 | — | — | — | 5.59 | 11.2 | 14.0 | 16.8 |
| 0.577 | — | — | — | 5.57 | 11.1 | 13.9 | 16.7 |
| 0.578 | — | — | — | 5.55 | 11.1 | 13.9 | 16.7 |
| 0.579 | — | — | — | 5.53 | 11.1 | 13.8 | 16.6 |
| 0.580 | — | — | — | 5.51 | 11.0 | 13.8 | 16.5 |
| 0.581 | — | — | — | 5.49 | 11.0 | 13.7 | 16.5 |
| 0.582 | — | — | — | 5.47 | 10.9 | 13.7 | 16.4 |
| 0.583 | — | — | — | 5.46 | 10.9 | 13.6 | 16.4 |
| 0.584 | — | — | — | 5.44 | 10.9 | 13.6 | 16.3 |
| 0.585 | — | — | — | 5.42 | 10.8 | 13.5 | 16.3 |
| 0.586 | — | — | — | 5.40 | 10.8 | 13.5 | 16.2 |
| 0.587 | — | — | — | 5.38 | 10.8 | 13.5 | 16.1 |
| 0.588 | — | — | — | 5.36 | 10.7 | 13.4 | 16.1 |
| 0.589 | — | — | — | 5.35 | 10.7 | 13.4 | 16.0 |
| 0.590 | — | — | — | 5.33 | 10.7 | 13.3 | 16.0 |
| 0.591 | — | — | — | 5.31 | 10.6 | 13.3 | 15.9 |
| 0.592 | — | — | — | 5.29 | 10.6 | 13.2 | 15.9 |
| 0.593 | — | — | — | 5.27 | 10.5 | 13.2 | 15.8 |
| 0.594 | — | — | — | 5.26 | 10.5 | 13.1 | 15.8 |
| 0.595 | — | — | — | 5.24 | 10.5 | 13.1 | 15.7 |
| 0.596 | — | — | — | 5.22 | 10.4 | 13.1 | 15.7 |
| 0.597 | — | — | — | 5.20 | 10.4 | 13.0 | 15.6 |
| 0.598 | — | — | — | 5.19 | 10.4 | 13.0 | 15.6 |
| 0.599 | — | — | — | 5.17 | 10.3 | 12.9 | 15.5 |
| 0.600 | — | — | — | 5.15 | 10.3 | 12.9 | 15.5 |
| 0.601 | — | — | — | 5.13 | 10.3 | 12.8 | 15.4 |
| 0.602 | — | — | — | 5.12 | 10.2 | 12.8 | 15.4 |
| 0.603 | — | — | — | 5.10 | 10.2 | 12.8 | 15.3 |
| 0.604 | — | — | — | 5.08 | 10.2 | 12.7 | 15.2 |
| 0.605 | — | — | — | 5.07 | 10.1 | 12.7 | 15.2 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.606 | — | — | — | 5.05 | 10.1 | 12.6 | 15.1 |
| 0.607 | — | — | — | 5.03 | 10.1 | 12.6 | 15.1 |
| 0.608 | — | — | — | 5.02 | 10.0 | 12.5 | 15.0 |
| 0.609 | — | — | — | 5.00 | 10.0 | 12.5 | 15.0 |
| 0.610 | — | — | — | 4.98 | 10.0 | 12.5 | 15.0 |
| 0.611 | — | — | — | 4.97 | 9.93 | 12.4 | 14.9 |
| 0.612 | — | — | — | 4.95 | 9.90 | 12.4 | 14.9 |
| 0.613 | — | — | — | 4.94 | 9.87 | 12.3 | 14.8 |
| 0.614 | — | — | — | 4.92 | 9.84 | 12.3 | 14.8 |
| 0.615 | — | — | — | 4.90 | 9.80 | 12.3 | 14.7 |
| 0.616 | — | — | — | — | 9.77 | 12.2 | 14.7 |
| 0.617 | — | — | — | — | 9.74 | 12.2 | 14.6 |
| 0.618 | — | — | — | — | 9.71 | 12.1 | 14.6 |
| 0.619 | — | — | — | — | 9.68 | 12.1 | 14.5 |
| 0.620 | — | — | — | — | 9.65 | 12.1 | 14.5 |
| 0.621 | — | — | — | — | 9.62 | 12.0 | 14.4 |
| 0.622 | — | — | — | — | 9.58 | 12.0 | 14.4 |
| 0.623 | — | — | — | — | 9.55 | 11.9 | 14.3 |
| 0.624 | — | — | — | — | 9.52 | 11.9 | 14.3 |
| 0.625 | — | — | — | — | 9.49 | 11.9 | 14.2 |
| 0.626 | — | — | — | — | 9.46 | 11.8 | 14.2 |
| 0.627 | — | — | — | — | 9.43 | 11.8 | 14.2 |
| 0.628 | — | — | — | — | 9.40 | 11.8 | 14.1 |
| 0.629 | — | — | — | — | 9.37 | 11.7 | 14.1 |
| 0.630 | — | — | — | — | 9.34 | 11.7 | 14.0 |
| 0.631 | — | — | — | — | 9.31 | 11.6 | 14.0 |
| 0.632 | — | — | — | — | 9.28 | 11.6 | 13.9 |
| 0.633 | — | — | — | — | 9.25 | 11.6 | 13.9 |
| 0.634 | — | — | — | — | 9.23 | 11.5 | 13.8 |
| 0.635 | — | — | — | — | 9.20 | 11.5 | 13.8 |
| 0.636 | — | — | — | — | 9.17 | 11.5 | 13.8 |
| 0.637 | — | — | — | — | 9.14 | 11.4 | 13.7 |
| 0.638 | — | — | — | — | 9.11 | 11.4 | 13.7 |
| 0.639 | — | — | — | — | 9.08 | 11.4 | 13.6 |
| 0.640 | — | — | — | — | 9.05 | 11.3 | 13.6 |
| 0.641 | — | — | — | — | 9.03 | 11.3 | 13.5 |
| 0.642 | — | — | — | — | 9.00 | 11.2 | 13.5 |
| 0.643 | — | — | — | — | 8.97 | 11.2 | 13.5 |
| 0.644 | — | — | — | — | 8.94 | 11.2 | 13.4 |
| 0.645 | — | — | — | — | 8.91 | 11.1 | 13.4 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.646 | — | — | — | — | 8.89 | 11.1 | 13.3 |
| 0.647 | — | — | — | — | 8.86 | 11.1 | 13.3 |
| 0.648 | — | — | — | — | 8.83 | 11.0 | 13.2 |
| 0.649 | — | — | — | — | 8.80 | 11.0 | 13.2 |
| 0.650 | — | — | — | — | 8.78 | 11.0 | 13.2 |
| 0.651 | — | — | — | — | 8.75 | 10.9 | 13.1 |
| 0.652 | — | — | — | — | 8.72 | 10.9 | 13.1 |
| 0.653 | — | — | — | — | 8.70 | 10.9 | 13.0 |
| 0.654 | — | — | — | — | 8.67 | 10.8 | 13.0 |
| 0.655 | — | — | — | — | 8.64 | 10.8 | 13.0 |
| 0.656 | — | — | — | — | 8.62 | 10.8 | 12.9 |
| 0.657 | — | — | — | — | 8.59 | 10.7 | 12.9 |
| 0.658 | — | — | — | — | 8.56 | 10.7 | 12.8 |
| 0.659 | — | — | — | — | 8.54 | 10.7 | 12.8 |
| 0.660 | — | — | — | — | 8.51 | 10.6 | 12.8 |
| 0.661 | — | — | — | — | 8.49 | 10.6 | 12.7 |
| 0.662 | — | — | — | — | 8.46 | 10.6 | 12.7 |
| 0.663 | — | — | — | — | 8.44 | 10.5 | 12.7 |
| 0.664 | — | — | — | — | 8.41 | 10.5 | 12.6 |
| 0.665 | — | — | — | — | 8.39 | 10.5 | 12.6 |
| 0.666 | — | — | — | — | 8.36 | 10.5 | 12.5 |
| 0.667 | — | — | — | — | 8.34 | 10.4 | 12.5 |
| 0.668 | — | — | — | — | 8.31 | 10.4 | 12.5 |
| 0.669 | — | — | — | — | 8.29 | 10.4 | 12.4 |
| 0.670 | — | — | — | — | 8.26 | 10.3 | 12.4 |
| 0.671 | — | — | — | — | 8.24 | 10.3 | 12.4 |
| 0.672 | — | — | — | — | 8.21 | 10.3 | 12.3 |
| 0.673 | — | — | — | — | 8.19 | 10.2 | 12.3 |
| 0.674 | — | — | — | — | 8.16 | 10.2 | 12.2 |
| 0.675 | — | — | — | — | 8.14 | 10.2 | 12.2 |
| 0.676 | — | — | — | — | 8.11 | 10.1 | 12.2 |
| 0.677 | — | — | — | — | 8.09 | 10.1 | 12.1 |
| 0.678 | — | — | — | — | 8.07 | 10.1 | 12.1 |
| 0.679 | — | — | — | — | 8.04 | 10.1 | 12.1 |
| 0.680 | — | — | — | — | 8.02 | 10.0 | 12.0 |
| 0.681 | — | — | — | — | 8.00 | 10.0 | 12.0 |
| 0.682 | — | — | — | — | 7.97 | 9.97 | 12.0 |
| 0.683 | — | — | — | — | 7.95 | 9.94 | 11.9 |
| 0.684 | — | — | — | — | 7.93 | 9.91 | 11.9 |
| 0.685 | — | — | — | — | 7.90 | 9.88 | 11.9 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.686 | — | — | — | — | 7.88 | 9.85 | 11.8 |
| 0.687 | — | — | — | — | 7.86 | 9.82 | 11.8 |
| 0.688 | — | — | — | — | 7.83 | 9.80 | 11.8 |
| 0.689 | — | — | — | — | 7.81 | 9.77 | 11.7 |
| 0.690 | — | — | — | — | 7.79 | 9.74 | 11.7 |
| 0.691 | — | — | — | — | 7.77 | 9.71 | 11.7 |
| 0.692 | — | — | — | — | 7.74 | 9.68 | 11.6 |
| 0.693 | — | — | — | — | 7.72 | 9.65 | 11.6 |
| 0.694 | — | — | — | — | 7.70 | 9.63 | 11.6 |
| 0.695 | — | — | — | — | 7.68 | 9.60 | 11.5 |
| 0.696 | — | — | — | — | 7.66 | 9.57 | 11.5 |
| 0.697 | — | — | — | — | 7.63 | 9.54 | 11.5 |
| 0.698 | — | — | — | — | 7.61 | 9.52 | 11.4 |
| 0.699 | — | — | — | — | 7.59 | 9.49 | 11.4 |
| 0.700 | — | — | — | — | 7.57 | 9.46 | 11.4 |
| 0.701 | — | — | — | — | 7.55 | 9.44 | 11.3 |
| 0.702 | — | — | — | — | 7.52 | 9.41 | 11.3 |
| 0.703 | — | — | — | — | 7.50 | 9.38 | 11.3 |
| 0.704 | — | — | — | — | 7.48 | 9.36 | 11.2 |
| 0.705 | — | — | — | — | 7.46 | 9.33 | 11.2 |
| 0.706 | — | — | — | — | 7.44 | 9.30 | 11.2 |
| 0.707 | — | — | — | — | 7.42 | 9.28 | 11.1 |
| 0.708 | — | — | — | — | 7.40 | 9.25 | 11.1 |
| 0.709 | — | — | — | — | 7.38 | 9.22 | 11.1 |
| 0.710 | — | — | — | — | 7.36 | 9.20 | 11.0 |
| 0.711 | — | — | — | — | 7.34 | 9.17 | 11.0 |
| 0.712 | — | — | — | — | 7.31 | 9.15 | 11.0 |
| 0.713 | — | — | — | — | 7.29 | 9.12 | 10.9 |
| 0.714 | — | — | — | — | 7.27 | 9.10 | 10.9 |
| 0.715 | — | — | — | — | 7.25 | 9.07 | 10.9 |
| 0.716 | — | — | — | — | 7.23 | 9.04 | 10.9 |
| 0.717 | — | — | — | — | 7.21 | 9.02 | 10.8 |
| 0.718 | — | — | — | — | 7.19 | 8.99 | 10.8 |
| 0.719 | — | — | — | — | 7.17 | 8.97 | 10.8 |
| 0.720 | — | — | — | — | 7.15 | 8.94 | 10.7 |
| 0.721 | — | — | — | — | 7.13 | 8.92 | 10.7 |
| 0.722 | — | — | — | — | 7.11 | 8.89 | 10.7 |
| 0.723 | — | — | — | — | 7.09 | 8.87 | 10.6 |
| 0.724 | — | — | — | — | 7.07 | 8.85 | 10.6 |
| 0.725 | — | — | — | — | 7.05 | 8.82 | 10.6 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.726 | — | — | — | — | 7.04 | 8.80 | 10.6 |
| 0.727 | — | — | — | — | 7.02 | 8.77 | 10.5 |
| 0.728 | — | — | — | — | 7.00 | 8.75 | 10.5 |
| 0.729 | — | — | — | — | 6.98 | 8.72 | 10.5 |
| 0.730 | — | — | — | — | 6.96 | 8.70 | 10.4 |
| 0.731 | — | — | — | — | 6.94 | 8.68 | 10.4 |
| 0.732 | — | — | — | — | 6.92 | 8.65 | 10.4 |
| 0.733 | — | — | — | — | 6.90 | 8.63 | 10.4 |
| 0.734 | — | — | — | — | 6.88 | 8.61 | 10.3 |
| 0.735 | — | — | — | — | 6.86 | 8.58 | 10.3 |
| 0.736 | — | — | — | — | 6.85 | 8.56 | 10.3 |
| 0.737 | — | — | — | — | 6.83 | 8.54 | 10.2 |
| 0.738 | — | — | — | — | 6.81 | 8.51 | 10.2 |
| 0.739 | — | — | — | — | 6.79 | 8.49 | 10.2 |
| 0.740 | — | — | — | — | 6.77 | 8.47 | 10.2 |
| 0.741 | — | — | — | — | 6.75 | 8.44 | 10.1 |
| 0.742 | — | — | — | — | 6.74 | 8.42 | 10.1 |
| 0.743 | — | — | — | — | 6.72 | 8.40 | 10.1 |
| 0.744 | — | — | — | — | 6.70 | 8.38 | 10.1 |
| 0.745 | — | — | — | — | 6.68 | 8.35 | 10.0 |
| 0.746 | — | — | — | — | 6.66 | 8.33 | 10.0 |
| 0.747 | — | — | — | — | 6.65 | 8.31 | 9.97 |
| 0.748 | — | — | — | — | 6.63 | 8.29 | 9.94 |
| 0.749 | — | — | — | — | 6.61 | 8.27 | 9.92 |
| 0.750 | — | — | — | — | 6.59 | 8.24 | 9.89 |
| 0.751 | — | — | — | — | 6.57 | 8.22 | 9.86 |
| 0.752 | — | — | — | — | 6.56 | 8.20 | 9.84 |
| 0.753 | — | — | — | — | 6.54 | 8.18 | 9.81 |
| 0.754 | — | — | — | — | 6.52 | 8.16 | 9.79 |
| 0.755 | — | — | — | — | 6.51 | 8.13 | 9.76 |
| 0.756 | — | — | — | — | 6.49 | 8.11 | 9.73 |
| 0.757 | — | — | — | — | 6.47 | 8.09 | 9.71 |
| 0.758 | — | — | — | — | 6.45 | 8.07 | 9.68 |
| 0.759 | — | — | — | — | 6.44 | 8.05 | 9.66 |
| 0.760 | — | — | — | — | 6.42 | 8.03 | 9.63 |
| 0.761 | — | — | — | — | 6.40 | 8.01 | 9.61 |
| 0.762 | — | — | — | — | 6.39 | 7.99 | 9.58 |
| 0.763 | — | — | — | — | 6.37 | 7.96 | 9.56 |
| 0.764 | — | — | — | — | 6.35 | 7.94 | 9.53 |
| 0.765 | — | — | — | — | 6.34 | 7.92 | 9.51 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.766 | — | — | — | — | 6.32 | 7.90 | 9.48 |
| 0.767 | — | — | — | — | 6.30 | 7.88 | 9.46 |
| 0.768 | — | — | — | — | 6.29 | 7.86 | 9.43 |
| 0.769 | — | — | — | — | 6.27 | 7.84 | 9.41 |
| 0.770 | — | — | — | — | 6.25 | 7.82 | 9.38 |
| 0.771 | — | — | — | — | 6.24 | 7.80 | 9.36 |
| 0.772 | — | — | — | — | 6.22 | 7.78 | 9.33 |
| 0.773 | — | — | — | — | 6.21 | 7.76 | 9.31 |
| 0.774 | — | — | — | — | 6.19 | 7.74 | 9.29 |
| 0.775 | — | — | — | — | 6.17 | 7.72 | 9.26 |
| 0.776 | — | — | — | — | 6.16 | 7.70 | 9.24 |
| 0.777 | — | — | — | — | 6.14 | 7.68 | 9.21 |
| 0.778 | — | — | — | — | 6.13 | 7.66 | 9.19 |
| 0.779 | — | — | — | — | 6.11 | 7.64 | 9.17 |
| 0.780 | — | — | — | — | 6.10 | 7.62 | 9.14 |
| 0.781 | — | — | — | — | 6.08 | 7.60 | 9.12 |
| 0.782 | — | — | — | — | 6.06 | 7.58 | 9.10 |
| 0.783 | — | — | — | — | 6.05 | 7.56 | 9.07 |
| 0.784 | — | — | — | — | 6.03 | 7.54 | 9.05 |
| 0.785 | — | — | — | — | 6.02 | 7.52 | 9.03 |
| 0.786 | — | — | — | — | 6.00 | 7.51 | 9.01 |
| 0.787 | — | — | — | — | 5.99 | 7.49 | 8.98 |
| 0.788 | — | — | — | — | 5.97 | 7.47 | 8.96 |
| 0.789 | — | — | — | — | 5.96 | 7.45 | 8.94 |
| 0.790 | — | — | — | — | 5.94 | 7.43 | 8.91 |
| 0.791 | — | — | — | — | 5.93 | 7.41 | 8.89 |
| 0.792 | — | — | — | — | 5.91 | 7.39 | 8.87 |
| 0.793 | — | — | — | — | 5.90 | 7.37 | 8.85 |
| 0.794 | — | — | — | — | 5.88 | 7.35 | 8.82 |
| 0.795 | — | — | — | — | 5.87 | 7.34 | 8.80 |
| 0.796 | — | — | — | — | 5.85 | 7.32 | 8.78 |
| 0.797 | — | — | — | — | 5.84 | 7.30 | 8.76 |
| 0.798 | — | — | — | — | 5.82 | 7.28 | 8.74 |
| 0.799 | — | — | — | — | 5.81 | 7.26 | 8.71 |
| 0.800 | — | — | — | — | 5.79 | 7.24 | 8.69 |
| 0.801 | — | — | — | — | 5.78 | 7.23 | 8.67 |
| 0.802 | — | — | — | — | 5.77 | 7.21 | 8.65 |
| 0.803 | — | — | — | — | 5.75 | 7.19 | 8.63 |
| 0.804 | — | — | — | — | 5.74 | 7.17 | 8.61 |
| 0.805 | — | — | — | — | 5.72 | 7.16 | 8.59 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.806 | — | — | — | — | 5.71 | 7.14 | 8.56 |
| 0.807 | — | — | — | — | 5.69 | 7.12 | 8.54 |
| 0.808 | — | — | — | — | 5.68 | 7.10 | 8.52 |
| 0.809 | — | — | — | — | 5.67 | 7.08 | 8.50 |
| 0.810 | — | — | — | — | 5.65 | 7.07 | 8.48 |
| 0.811 | — | — | — | — | 5.64 | 7.05 | 8.46 |
| 0.812 | — | — | — | — | 5.62 | 7.03 | 8.44 |
| 0.813 | — | — | — | — | 5.61 | 7.02 | 8.42 |
| 0.814 | — | — | — | — | 5.60 | 7.00 | 8.40 |
| 0.815 | — | — | — | — | 5.58 | 6.98 | 8.38 |
| 0.816 | — | — | — | — | 5.57 | 6.96 | 8.36 |
| 0.817 | — | — | — | — | 5.56 | 6.95 | 8.33 |
| 0.818 | — | — | — | — | 5.54 | 6.93 | 8.31 |
| 0.819 | — | — | — | — | 5.53 | 6.91 | 8.29 |
| 0.820 | — | — | — | — | 5.51 | 6.90 | 8.27 |
| 0.821 | — | — | — | — | 5.50 | 6.88 | 8.25 |
| 0.822 | — | — | — | — | 5.49 | 6.86 | 8.23 |
| 0.823 | — | — | — | — | 5.47 | 6.85 | 8.21 |
| 0.824 | — | — | — | — | 5.46 | 6.83 | 8.19 |
| 0.825 | — | — | — | — | 5.45 | 6.81 | 8.17 |
| 0.826 | — | — | — | — | 5.44 | 6.80 | 8.15 |
| 0.827 | — | — | — | — | 5.42 | 6.78 | 8.13 |
| 0.828 | — | — | — | — | 5.41 | 6.76 | 8.11 |
| 0.829 | — | — | — | — | 5.40 | 6.75 | 8.10 |
| 0.830 | — | — | — | — | 5.38 | 6.73 | 8.08 |
| 0.831 | — | — | — | — | 5.37 | 6.71 | 8.06 |
| 0.832 | — | — | — | — | 5.36 | 6.70 | 8.04 |
| 0.833 | — | — | — | — | 5.34 | 6.68 | 8.02 |
| 0.834 | — | — | — | — | 5.33 | 6.67 | 8.00 |
| 0.835 | — | — | — | — | 5.32 | 6.65 | 7.98 |
| 0.836 | — | — | — | — | 5.31 | 6.63 | 7.96 |
| 0.837 | — | — | — | — | 5.29 | 6.62 | 7.94 |
| 0.838 | — | — | — | — | 5.28 | 6.60 | 7.92 |
| 0.839 | — | — | — | — | 5.27 | 6.59 | 7.90 |
| 0.840 | — | — | — | — | 5.26 | 6.57 | 7.88 |
| 0.841 | — | — | — | — | 5.24 | 6.56 | 7.87 |
| 0.842 | — | — | — | — | 5.23 | 6.54 | 7.85 |
| 0.843 | — | — | — | — | 5.22 | 6.52 | 7.83 |
| 0.844 | — | — | — | — | 5.21 | 6.51 | 7.81 |
| 0.845 | — | — | — | — | 5.19 | 6.49 | 7.79 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.961 | 2.942 | 4.903 | 9.807 | 19.61 | 24.52 | 29.42 |
| | 维氏硬度 | | | | | | |
| | HV0.2 | HV0.3 | HV0.5 | HV1 | HV2 | HV2.5 | HV3 |
| 0.846 | — | — | — | — | 5.18 | 6.48 | 7.77 |
| 0.847 | — | — | — | — | 5.17 | 6.46 | 7.75 |
| 0.848 | — | — | — | — | 5.16 | 6.45 | 7.74 |
| 0.849 | — | — | — | — | 5.14 | 6.43 | 7.72 |
| 0.850 | — | — | — | — | 5.13 | 6.42 | 7.70 |

**表 3-16　平面维氏硬度值计算表（HV5～HV100）**

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.056 | 2957 | — | — | — | — | — |
| 0.057 | 2854 | — | — | — | — | — |
| 0.058 | 2756 | — | — | — | — | — |
| 0.059 | 2663 | — | — | — | — | — |
| 0.060 | 2575 | — | — | — | — | — |
| 0.061 | 2492 | — | — | — | — | — |
| 0.062 | 2412 | — | — | — | — | — |
| 0.063 | 2336 | — | — | — | — | — |
| 0.064 | 2264 | — | — | — | — | — |
| 0.065 | 2194 | — | — | — | — | — |
| 0.066 | 2128 | — | — | — | — | — |
| 0.067 | 2065 | — | — | — | — | — |
| 0.068 | 2005 | — | — | — | — | — |
| 0.069 | 1947 | — | — | — | — | — |
| 0.070 | 1892 | — | — | — | — | — |
| 0.071 | 1839 | — | — | — | — | — |
| 0.072 | 1788 | — | — | — | — | — |
| 0.073 | 1740 | — | — | — | — | — |
| 0.074 | 1693 | — | — | — | — | — |
| 0.075 | 1648 | — | — | — | — | — |
| 0.076 | 1605 | — | — | — | — | — |
| 0.077 | 1564 | — | — | — | — | — |
| 0.078 | 1524 | — | — | — | — | — |
| 0.079 | 1486 | 2971 | — | — | — | — |
| 0.080 | 1449 | 2898 | — | — | — | — |
| 0.081 | 1413 | 2827 | — | — | — | — |
| 0.082 | 1379 | 2758 | — | — | — | — |
| 0.083 | 1346 | 2692 | — | — | — | — |
| 0.084 | 1314 | 2628 | — | — | — | — |
| 0.085 | 1283 | 2567 | — | — | — | |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.086 | 1254 | 2507 | — | — | — | — |
| 0.087 | 1225 | 2450 | — | — | — | — |
| 0.088 | 1197 | 2395 | — | — | — | — |
| 0.089 | 1171 | 2341 | — | — | — | — |
| 0.090 | 1145 | 2290 | — | — | — | — |
| 0.091 | 1120 | 2239 | — | — | — | — |
| 0.092 | 1095 | 2191 | — | — | — | — |
| 0.093 | 1072 | 2144 | — | — | — | — |
| 0.094 | 1049 | 2099 | — | — | — | — |
| 0.095 | 1027 | 2055 | — | — | — | — |
| 0.096 | 1006 | 2012 | — | — | — | — |
| 0.097 | 985 | 1971 | — | — | — | — |
| 0.098 | 965 | 1931 | — | — | — | — |
| 0.099 | 946 | 1892 | — | — | — | — |
| 0.100 | 927 | 1855 | — | — | — | — |
| 0.101 | 909 | 1818 | — | — | — | — |
| 0.102 | 891 | 1782 | — | — | — | — |
| 0.103 | 874 | 1748 | — | — | — | — |
| 0.104 | 857 | 1715 | — | — | — | — |
| 0.105 | 841 | 1682 | — | — | — | — |
| 0.106 | 825 | 1651 | — | — | — | — |
| 0.107 | 810 | 1620 | — | — | — | — |
| 0.108 | 795 | 1590 | — | — | — | — |
| 0.109 | 780 | 1561 | — | — | — | — |
| 0.110 | 766 | 1533 | — | — | — | — |
| 0.111 | 753 | 1505 | — | — | — | — |
| 0.112 | 739 | 1478 | 2956 | — | — | — |
| 0.113 | 726 | 1452 | 2904 | — | — | — |
| 0.114 | 713 | 1427 | 2853 | — | — | — |
| 0.115 | 701 | 1402 | 2804 | — | — | — |
| 0.116 | 689 | 1378 | 2756 | — | — | — |
| 0.117 | 677 | 1355 | 2709 | — | — | — |
| 0.118 | 666 | 1332 | 2663 | — | — | — |
| 0.119 | 655 | 1310 | 2619 | — | — | — |
| 0.120 | 644 | 1288 | 2575 | — | — | — |
| 0.121 | 633 | 1267 | 2533 | — | — | — |
| 0.122 | 623 | 1246 | 2491 | — | — | — |
| 0.123 | 613 | 1226 | 2451 | — | — | — |
| 0.124 | 603 | 1206 | 2412 | — | — | — |
| 0.125 | 593 | 1187 | 2373 | — | — | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.126 | 584 | 1168 | 2336 | — | — | — |
| 0.127 | 575 | 1150 | 2299 | — | — | — |
| 0.128 | 566 | 1132 | 2263 | — | — | — |
| 0.129 | 557 | 1114 | 2228 | — | — | — |
| 0.130 | 549 | 1097 | 2194 | — | — | — |
| 0.131 | 540 | 1081 | 2161 | — | — | — |
| 0.132 | 532 | 1064 | 2128 | — | — | — |
| 0.133 | 524 | 1048 | 2096 | — | — | — |
| 0.134 | 516 | 1033 | 2065 | — | — | — |
| 0.135 | 509 | 1018 | 2035 | — | — | — |
| 0.136 | 501 | 1003 | 2005 | — | — | — |
| 0.137 | 494 | 988 | 1976 | 2964 | — | — |
| 0.138 | 487 | 974 | 1947 | 2921 | — | — |
| 0.139 | 480 | 960 | 1919 | 2879 | — | — |
| 0.140 | 473 | 946 | 1892 | 2838 | — | — |
| 0.141 | 466 | 933 | 1865 | 2798 | — | — |
| 0.142 | 460 | 920 | 1839 | 2759 | — | — |
| 0.143 | 453 | 907 | 1813 | 2721 | — | — |
| 0.144 | 447 | 894 | 1788 | 2683 | — | — |
| 0.145 | 441 | 882 | 1764 | 2646 | — | — |
| 0.146 | 435 | 870 | 1740 | 2610 | — | — |
| 0.147 | 429 | 858 | 1716 | 2575 | — | — |
| 0.148 | 423 | 847 | 1693 | 2540 | — | — |
| 0.149 | 418 | 835 | 1670 | 2506 | — | — |
| 0.150 | 412 | 824 | 1648 | 2473 | — | — |
| 0.151 | 407 | 813 | 1626 | 2440 | — | — |
| 0.152 | 401 | 803 | 1605 | 2408 | — | — |
| 0.153 | 396 | 792 | 1584 | 2377 | — | — |
| 0.154 | 391 | 782 | 1564 | 2346 | — | — |
| 0.155 | 386 | 772 | 1543 | 2316 | — | — |
| 0.156 | 381 | 762 | 1524 | 2286 | — | — |
| 0.157 | 376 | 752 | 1504 | 2257 | — | — |
| 0.158 | 371 | 743 | 1485 | 2229 | — | — |
| 0.159 | 367 | 734 | 1467 | 2201 | — | — |
| 0.160 | 362 | 724 | 1449 | 2173 | — | — |
| 0.161 | 358 | 715 | 1431 | 2146 | — | — |
| 0.162 | 353 | 707 | 1413 | 2120 | — | — |
| 0.163 | 349 | 698 | 1396 | 2094 | — | — |
| 0.164 | 345 | 690 | 1379 | 2068 | — | — |
| 0.165 | 341 | 681 | 1362 | 2043 | — | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.166 | 336 | 673 | 1346 | 2019 | — | — |
| 0.167 | 332 | 665 | 1330 | 1995 | — | — |
| 0.168 | 328 | 657 | 1314 | 1971 | — | — |
| 0.169 | 325 | 649 | 1298 | 1948 | — | — |
| 0.170 | 321 | 642 | 1283 | 1925 | — | — |
| 0.171 | 317 | 634 | 1268 | 1903 | — | — |
| 0.172 | 313 | 627 | 1253 | 1881 | — | — |
| 0.173 | 310 | 620 | 1239 | 1859 | — | — |
| 0.174 | 306 | 613 | 1225 | 1838 | — | — |
| 0.175 | 303 | 606 | 1211 | 1817 | — | — |
| 0.176 | 299 | 599 | 1197 | 1796 | 2993 | — |
| 0.177 | 296 | 592 | 1184 | 1776 | 2959 | — |
| 0.178 | 293 | 585 | 1170 | 1756 | 2926 | — |
| 0.179 | 289 | 579 | 1157 | 1736 | 2894 | — |
| 0.180 | 286 | 572 | 1145 | 1717 | 2862 | — |
| 0.181 | 283 | 566 | 1132 | 1698 | 2830 | — |
| 0.182 | 280 | 560 | 1120 | 1680 | 2799 | — |
| 0.183 | 277 | 554 | 1107 | 1661 | 2769 | — |
| 0.184 | 274 | 548 | 1095 | 1643 | 2739 | — |
| 0.185 | 271 | 542 | 1083 | 1626 | 2709 | — |
| 0.186 | 268 | 536 | 1072 | 1608 | 2680 | — |
| 0.187 | 265 | 530 | 1060 | 1591 | 2651 | — |
| 0.188 | 262 | 525 | 1049 | 1574 | 2623 | — |
| 0.189 | 260 | 519 | 1038 | 1557 | 2596 | — |
| 0.190 | 257 | 514 | 1027 | 1541 | 2568 | — |
| 0.191 | 254 | 508 | 1016 | 1525 | 2541 | — |
| 0.192 | 252 | 503 | 1006 | 1509 | 2515 | |
| 0.193 | 249 | 498 | 996 | 1494 | 2489 | — |
| 0.194 | 246 | 493 | 985 | 1478 | 2463 | — |
| 0.195 | 244 | 488 | 975 | 1463 | 2438 | — |
| 0.196 | 241 | 483 | 965 | 1448 | 2413 | — |
| 0.197 | 239 | 478 | 956 | 1434 | 2389 | — |
| 0.198 | 236 | 473 | 946 | 1419 | 2365 | — |
| 0.199 | 234 | 468 | 936 | 1405 | 2341 | — |
| 0.200 | 232 | 464 | 927 | 1391 | 2318 | — |
| 0.201 | 229 | 459 | 918 | 1377 | 2295 | — |
| 0.202 | 227 | 454 | 909 | 1363 | 2272 | — |
| 0.203 | 225 | 450 | 900 | 1350 | 2250 | — |
| 0.204 | 223 | 446 | 891 | 1337 | 2228 | — |
| 0.205 | 221 | 441 | 882 | 1324 | 2206 | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.206 | 218 | 437 | 874 | 1311 | 2185 | — |
| 0.207 | 216 | 433 | 865 | 1298 | 2164 | — |
| 0.208 | 214 | 429 | 857 | 1286 | 2143 | — |
| 0.209 | 212 | 425 | 849 | 1274 | 2123 | — |
| 0.210 | 210 | 421 | 841 | 1262 | 2102 | — |
| 0.211 | 208 | 417 | 833 | 1250 | 2083 | — |
| 0.212 | 206 | 413 | 825 | 1238 | 2063 | — |
| 0.213 | 204 | 409 | 817 | 1226 | 2044 | — |
| 0.214 | 202 | 405 | 810 | 1215 | 2025 | — |
| 0.215 | 201 | 401 | 802 | 1204 | 2006 | — |
| 0.216 | 199 | 397 | 795 | 1192 | 1987 | — |
| 0.217 | 197 | 394 | 787 | 1181 | 1969 | — |
| 0.218 | 195 | 390 | 780 | 1171 | 1951 | — |
| 0.219 | 193 | 387 | 773 | 1160 | 1933 | — |
| 0.220 | 192 | 383 | 766 | 1149 | 1916 | — |
| 0.221 | 190 | 380 | 759 | 1139 | 1898 | — |
| 0.222 | 188 | 376 | 752 | 1129 | 1881 | — |
| 0.223 | 186 | 373 | 746 | 1119 | 1864 | — |
| 0.224 | 185 | 370 | 739 | 1109 | 1848 | — |
| 0.225 | 183 | 366 | 732 | 1099 | 1831 | — |
| 0.226 | 182 | 363 | 726 | 1089 | 1815 | — |
| 0.227 | 180 | 360 | 720 | 1080 | 1799 | — |
| 0.228 | 178 | 357 | 713 | 1070 | 1784 | — |
| 0.229 | 177 | 354 | 707 | 1061 | 1768 | — |
| 0.230 | 175 | 351 | 701 | 1052 | 1753 | — |
| 0.231 | 174 | 348 | 695 | 1043 | 1738 | — |
| 0.232 | 172 | 345 | 689 | 1034 | 1723 | — |
| 0.233 | 171 | 342 | 683 | 1025 | 1708 | — |
| 0.234 | 169 | 339 | 677 | 1016 | 1693 | — |
| 0.235 | 168 | 336 | 671 | 1007 | 1679 | — |
| 0.236 | 166 | 333 | 666 | 999 | 1665 | — |
| 0.237 | 165 | 330 | 660 | 990 | 1651 | — |
| 0.238 | 164 | 327 | 655 | 982 | 1637 | — |
| 0.239 | 162 | 325 | 649 | 974 | 1623 | — |
| 0.240 | 161 | 322 | 644 | 966 | 1610 | — |
| 0.241 | 160 | 319 | 638 | 958 | 1596 | — |
| 0.242 | 158 | 317 | 633 | 950 | 1583 | — |
| 0.243 | 157 | 314 | 628 | 942 | 1570 | — |
| 0.244 | 156 | 311 | 623 | 934 | 1557 | — |
| 0.245 | 154 | 309 | 618 | 927 | 1545 | — |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.246 | 153 | 306 | 613 | 919 | 1532 | — |
| 0.247 | 152 | 304 | 608 | 912 | 1520 | — |
| 0.248 | 151 | 302 | 603 | 905 | 1507 | — |
| 0.249 | 150 | 299 | 598 | 897 | 1495 | — |
| 0.250 | 148 | 297 | 593 | 890 | 1483 | — |
| 0.251 | 147 | 294 | 589 | 883 | 1472 | — |
| 0.252 | 146 | 292 | 584 | 876 | 1460 | — |
| 0.253 | 145 | 290 | 579 | 869 | 1448 | — |
| 0.254 | 144 | 287 | 575 | 862 | 1437 | — |
| 0.255 | 143 | 285 | 570 | 856 | 1426 | — |
| 0.256 | 141 | 283 | 566 | 849 | 1415 | 2830 |
| 0.257 | 140 | 281 | 561 | 842 | 1404 | 2808 |
| 0.258 | 139 | 279 | 557 | 836 | 1393 | 2786 |
| 0.259 | 138 | 276 | 553 | 829 | 1382 | 2765 |
| 0.260 | 137 | 274 | 549 | 823 | 1372 | 2743 |
| 0.261 | 136 | 272 | 544 | 817 | 1361 | 2722 |
| 0.262 | 135 | 270 | 540 | 810 | 1351 | 2702 |
| 0.263 | 134 | 268 | 536 | 804 | 1340 | 2681 |
| 0.264 | 133 | 266 | 532 | 798 | 1330 | 2661 |
| 0.265 | 132 | 264 | 528 | 792 | 1320 | 2641 |
| 0.266 | 131 | 262 | 524 | 786 | 1310 | 2621 |
| 0.267 | 130 | 260 | 520 | 780 | 1301 | 2601 |
| 0.268 | 129 | 258 | 516 | 775 | 1291 | 2582 |
| 0.269 | 128 | 256 | 512 | 769 | 1281 | 2563 |
| 0.270 | 127 | 254 | 509 | 763 | 1272 | 2544 |
| 0.271 | 126 | 253 | 505 | 758 | 1262 | 2525 |
| 0.272 | 125 | 251 | 501 | 752 | 1253 | 2507 |
| 0.273 | 124 | 249 | 498 | 746 | 1244 | 2488 |
| 0.274 | 123 | 247 | 494 | 741 | 1235 | 2470 |
| 0.275 | 123 | 245 | 490 | 736 | 1226 | 2452 |
| 0.276 | 122 | 243 | 487 | 730 | 1217 | 2434 |
| 0.277 | 121 | 242 | 483 | 725 | 1208 | 2417 |
| 0.278 | 120 | 240 | 480 | 720 | 1200 | 2400 |
| 0.279 | 119 | 238 | 476 | 715 | 1191 | 2382 |
| 0.280 | 118 | 237 | 473 | 710 | 1183 | 2365 |
| 0.281 | 117 | 235 | 470 | 705 | 1174 | 2349 |
| 0.282 | 117 | 233 | 466 | 700 | 1166 | 2332 |
| 0.283 | 116 | 232 | 463 | 695 | 1158 | 2316 |
| 0.284 | 115 | 230 | 460 | 690 | 1150 | 2299 |
| 0.285 | 114 | 228 | 457 | 685 | 1141 | 2283 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.286 | 113 | 227 | 453 | 680 | 1133 | 2267 |
| 0.287 | 113 | 225 | 450 | 675 | 1126 | 2251 |
| 0.288 | 112 | 224 | 447 | 671 | 1118 | 2236 |
| 0.289 | 111 | 222 | 444 | 666 | 1110 | 2220 |
| 0.290 | 110 | 221 | 441 | 662 | 1102 | 2205 |
| 0.291 | 109 | 219 | 438 | 657 | 1095 | 2190 |
| 0.292 | 109 | 218 | 435 | 652 | 1087 | 2175 |
| 0.293 | 108 | 216 | 432 | 648 | 1080 | 2160 |
| 0.294 | 107 | 215 | 429 | 644 | 1073 | 2146 |
| 0.295 | 107 | 213 | 426 | 639 | 1065 | 2131 |
| 0.296 | 106 | 212 | 423 | 635 | 1058 | 2117 |
| 0.297 | 105 | 210 | 420 | 631 | 1051 | 2102 |
| 0.298 | 104 | 209 | 418 | 626 | 1044 | 2088 |
| 0.299 | 104 | 207 | 415 | 622 | 1037 | 2074 |
| 0.300 | 103 | 206 | 412 | 618 | 1030 | 2061 |
| 0.301 | 102 | 205 | 409 | 614 | 1023 | 2047 |
| 0.302 | 102 | 203 | 407 | 610 | 1017 | 2033 |
| 0.303 | 101 | 202 | 404 | 606 | 1010 | 2020 |
| 0.304 | 100 | 201 | 401 | 602 | 1003 | 2007 |
| 0.305 | 99.7 | 199 | 399 | 598 | 997 | 1994 |
| 0.306 | 99.0 | 198 | 396 | 594 | 990 | 1981 |
| 0.307 | 98.4 | 197 | 393 | 590 | 984 | 1968 |
| 0.308 | 97.7 | 195 | 391 | 586 | 977 | 1955 |
| 0.309 | 97.1 | 194 | 388 | 583 | 971 | 1942 |
| 0.310 | 96.5 | 193 | 386 | 579 | 965 | 1930 |
| 0.311 | 95.9 | 192 | 383 | 575 | 959 | 1917 |
| 0.312 | 95.2 | 191 | 381 | 572 | 952 | 1905 |
| 0.313 | 94.6 | 189 | 379 | 568 | 946 | 1893 |
| 0.314 | 94.0 | 188 | 376 | 564 | 940 | 1881 |
| 0.315 | 93.4 | 187 | 374 | 561 | 934 | 1869 |
| 0.316 | 92.8 | 186 | 371 | 557 | 928 | 1857 |
| 0.317 | 92.3 | 185 | 369 | 554 | 923 | 1845 |
| 0.318 | 91.7 | 183 | 367 | 550 | 917 | 1834 |
| 0.319 | 91.1 | 182 | 364 | 547 | 911 | 1822 |
| 0.320 | 90.5 | 181 | 362 | 543 | 905 | 1811 |
| 0.321 | 90.0 | 180 | 360 | 540 | 900 | 1800 |
| 0.322 | 89.4 | 179 | 358 | 537 | 894 | 1789 |
| 0.323 | 88.9 | 178 | 355 | 533 | 889 | 1778 |
| 0.324 | 88.3 | 177 | 353 | 530 | 883 | 1767 |
| 0.325 | 87.8 | 176 | 351 | 527 | 878 | 1756 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.326 | 87.2 | 174 | 349 | 523 | 872 | 1745 |
| 0.327 | 86.7 | 173 | 347 | 520 | 867 | 1734 |
| 0.328 | 86.2 | 172 | 345 | 517 | 862 | 1724 |
| 0.329 | 85.7 | 171 | 343 | 514 | 857 | 1713 |
| 0.330 | 85.1 | 170 | 341 | 511 | 851 | 1703 |
| 0.331 | 84.6 | 169 | 338 | 508 | 846 | 1693 |
| 0.332 | 84.1 | 168 | 336 | 505 | 841 | 1682 |
| 0.333 | 83.6 | 167 | 334 | 502 | 836 | 1672 |
| 0.334 | 83.1 | 166 | 332 | 499 | 831 | 1662 |
| 0.335 | 82.6 | 165 | 330 | 496 | 826 | 1652 |
| 0.336 | 82.1 | 164 | 328 | 493 | 821 | 1643 |
| 0.337 | 81.6 | 163 | 327 | 490 | 816 | 1633 |
| 0.338 | 81.2 | 162 | 325 | 487 | 812 | 1623 |
| 0.339 | 80.7 | 161 | 323 | 484 | 807 | 1614 |
| 0.340 | 80.2 | 160 | 321 | 481 | 802 | 1604 |
| 0.341 | 79.7 | 159 | 319 | 478 | 797 | 1595 |
| 0.342 | 79.3 | 159 | 317 | 476 | 793 | 1586 |
| 0.343 | 78.8 | 158 | 315 | 473 | 788 | 1576 |
| 0.344 | 78.3 | 157 | 313 | 470 | 783 | 1567 |
| 0.345 | 77.9 | 156 | 312 | 467 | 779 | 1558 |
| 0.346 | 77.4 | 155 | 310 | 465 | 774 | 1549 |
| 0.347 | 77.0 | 154 | 308 | 462 | 770 | 1540 |
| 0.348 | 76.6 | 153 | 306 | 459 | 766 | 1531 |
| 0.349 | 76.1 | 152 | 304 | 457 | 761 | 1523 |
| 0.350 | 75.7 | 151 | 303 | 454 | 757 | 1514 |
| 0.351 | 75.3 | 151 | 301 | 452 | 753 | 1505 |
| 0.352 | 74.8 | 150 | 299 | 449 | 748 | 1497 |
| 0.353 | 74.4 | 149 | 298 | 446 | 744 | 1488 |
| 0.354 | 74.0 | 148 | 296 | 444 | 740 | 1480 |
| 0.355 | 73.6 | 147 | 294 | 441 | 736 | 1472 |
| 0.356 | 73.2 | 146 | 293 | 439 | 732 | 1463 |
| 0.357 | 72.7 | 146 | 291 | 437 | 727 | 1455 |
| 0.358 | 72.3 | 145 | 289 | 434 | 723 | 1447 |
| 0.359 | 71.9 | 144 | 288 | 432 | 719 | 1439 |
| 0.360 | 71.5 | 143 | 286 | 429 | 715 | 1431 |
| 0.361 | 71.1 | 142 | 285 | 427 | 711 | 1423 |
| 0.362 | 70.8 | 142 | 283 | 425 | 708 | 1415 |
| 0.363 | 70.4 | 141 | 281 | 422 | 704 | 1407 |
| 0.364 | 70.0 | 140 | 280 | 420 | 700 | 1400 |
| 0.365 | 69.6 | 139 | 278 | 418 | 696 | 1392 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.366 | 69.2 | 138 | 277 | 415 | 692 | 1384 |
| 0.367 | 68.8 | 138 | 275 | 413 | 688 | 1377 |
| 0.368 | 68.5 | 137 | 274 | 411 | 685 | 1369 |
| 0.369 | 68.1 | 136 | 272 | 409 | 681 | 1362 |
| 0.370 | 67.7 | 135 | 271 | 406 | 677 | 1355 |
| 0.371 | 67.4 | 135 | 269 | 404 | 674 | 1347 |
| 0.372 | 67.0 | 134 | 268 | 402 | 670 | 1340 |
| 0.373 | 66.6 | 133 | 267 | 400 | 666 | 1333 |
| 0.374 | 66.3 | 133 | 265 | 398 | 663 | 1326 |
| 0.375 | 65.9 | 132 | 264 | 396 | 659 | 1319 |
| 0.376 | 65.6 | 131 | 262 | 394 | 656 | 1312 |
| 0.377 | 65.2 | 130 | 261 | 391 | 652 | 1305 |
| 0.378 | 64.9 | 130 | 260 | 389 | 649 | 1298 |
| 0.379 | 64.5 | 129 | 258 | 387 | 645 | 1291 |
| 0.380 | 64.2 | 128 | 257 | 385 | 642 | 1284 |
| 0.381 | 63.9 | 128 | 255 | 383 | 639 | 1278 |
| 0.382 | 63.5 | 127 | 254 | 381 | 635 | 1271 |
| 0.383 | 63.2 | 126 | 253 | 379 | 632 | 1264 |
| 0.384 | 62.9 | 126 | 251 | 377 | 629 | 1258 |
| 0.385 | 62.6 | 125 | 250 | 375 | 626 | 1251 |
| 0.386 | 62.2 | 124 | 249 | 373 | 622 | 1245 |
| 0.387 | 61.9 | 124 | 248 | 371 | 619 | 1238 |
| 0.388 | 61.6 | 123 | 246 | 370 | 616 | 1232 |
| 0.389 | 61.3 | 123 | 245 | 368 | 613 | 1226 |
| 0.390 | 61.0 | 122 | 244 | 366 | 610 | 1219 |
| 0.391 | 60.6 | 121 | 243 | 364 | 606 | 1213 |
| 0.392 | 60.3 | 121 | 241 | 362 | 603 | 1207 |
| 0.393 | 60.0 | 120 | 240 | 360 | 600 | 1201 |
| 0.394 | 59.7 | 119 | 239 | 358 | 597 | 1195 |
| 0.395 | 59.4 | 119 | 238 | 357 | 594 | 1189 |
| 0.396 | 59.1 | 118 | 236 | 355 | 591 | 1183 |
| 0.397 | 58.8 | 118 | 235 | 353 | 588 | 1177 |
| 0.398 | 58.5 | 117 | 234 | 351 | 585 | 1171 |
| 0.399 | 58.2 | 116 | 233 | 349 | 582 | 1165 |
| 0.400 | 57.9 | 116 | 232 | 348 | 579 | 1159 |
| 0.401 | 57.7 | 115 | 231 | 346 | 577 | 1153 |
| 0.402 | 57.4 | 115 | 229 | 344 | 574 | 1148 |
| 0.403 | 57.1 | 114 | 228 | 343 | 571 | 1142 |
| 0.404 | 56.8 | 114 | 227 | 341 | 568 | 1136 |
| 0.405 | 56.5 | 113 | 226 | 339 | 565 | 1131 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.406 | 56.2 | 113 | 225 | 338 | 562 | 1125 |
| 0.407 | 56.0 | 112 | 224 | 336 | 560 | 1120 |
| 0.408 | 55.7 | 111 | 223 | 334 | 557 | 1114 |
| 0.409 | 55.4 | 111 | 222 | 333 | 554 | 1109 |
| 0.410 | 55.2 | 110 | 221 | 331 | 552 | 1103 |
| 0.411 | 54.9 | 110 | 220 | 329 | 549 | 1098 |
| 0.412 | 54.6 | 109 | 218 | 328 | 546 | 1093 |
| 0.413 | 54.4 | 109 | 217 | 326 | 544 | 1087 |
| 0.414 | 54.1 | 108 | 216 | 325 | 541 | 1082 |
| 0.415 | 53.8 | 108 | 215 | 323 | 538 | 1077 |
| 0.416 | 53.6 | 107 | 214 | 321 | 536 | 1072 |
| 0.417 | 53.3 | 107 | 213 | 320 | 533 | 1066 |
| 0.418 | 53.1 | 106 | 212 | 318 | 531 | 1061 |
| 0.419 | 52.8 | 106 | 211 | 317 | 528 | 1056 |
| 0.420 | 52.6 | 105 | 210 | 315 | 526 | 1051 |
| 0.421 | 52.3 | 105 | 209 | 314 | 523 | 1046 |
| 0.422 | 52.1 | 104 | 208 | 312 | 521 | 1041 |
| 0.423 | 51.8 | 104 | 207 | 311 | 518 | 1036 |
| 0.424 | 51.6 | 103 | 206 | 309 | 516 | 1032 |
| 0.425 | 51.3 | 103 | 205 | 308 | 513 | 1027 |
| 0.426 | 51.1 | 102 | 204 | 307 | 511 | 1022 |
| 0.427 | 50.9 | 102 | 203 | 305 | 509 | 1017 |
| 0.428 | 50.6 | 101 | 202 | 304 | 506 | 1012 |
| 0.429 | 50.4 | 101 | 201 | 302 | 504 | 1008 |
| 0.430 | 50.1 | 100 | 201 | 301 | 501 | 1003 |
| 0.431 | 49.9 | 99.8 | 200 | 299 | 499 | 998 |
| 0.432 | 49.7 | 99.4 | 199 | 298 | 497 | 994 |
| 0.433 | 49.5 | 98.9 | 198 | 297 | 495 | 989 |
| 0.434 | 49.2 | 98.5 | 197 | 295 | 492 | 985 |
| 0.435 | 49.0 | 98.0 | 196 | 294 | 490 | 980 |
| 0.436 | 48.8 | 97.6 | 195 | 293 | 488 | 976 |
| 0.437 | 48.6 | 97.1 | 194 | 291 | 486 | 971 |
| 0.438 | 48.3 | 96.7 | 193 | 290 | 483 | 967 |
| 0.439 | 48.1 | 96.2 | 192 | 289 | 481 | 962 |
| 0.440 | 47.9 | 95.8 | 192 | 287 | 479 | 958 |
| 0.441 | 47.7 | 95.4 | 191 | 286 | 477 | 954 |
| 0.442 | 47.5 | 94.9 | 190 | 285 | 475 | 949 |
| 0.443 | 47.2 | 94.5 | 189 | 283 | 472 | 945 |
| 0.444 | 47.0 | 94.1 | 188 | 282 | 470 | 941 |
| 0.445 | 46.8 | 93.6 | 187 | 281 | 468 | 936 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.446 | 46.6 | 93.2 | 186 | 280 | 466 | 932 |
| 0.447 | 46.4 | 92.8 | 186 | 278 | 464 | 928 |
| 0.448 | 46.2 | 92.4 | 185 | 277 | 462 | 924 |
| 0.449 | 46.0 | 92.0 | 184 | 276 | 460 | 920 |
| 0.450 | 45.8 | 91.6 | 183 | 275 | 458 | 916 |
| 0.451 | 45.6 | 91.2 | 182 | 274 | 456 | 912 |
| 0.452 | 45.4 | 90.8 | 182 | 272 | 454 | 908 |
| 0.453 | 45.2 | 90.4 | 181 | 271 | 452 | 904 |
| 0.454 | 45.0 | 90.0 | 180 | 270 | 450 | 900 |
| 0.455 | 44.8 | 89.6 | 179 | 269 | 448 | 896 |
| 0.456 | 44.6 | 89.2 | 178 | 268 | 446 | 892 |
| 0.457 | 44.4 | 88.8 | 178 | 266 | 444 | 888 |
| 0.458 | 44.2 | 88.4 | 177 | 265 | 442 | 884 |
| 0.459 | 44.0 | 88.0 | 176 | 264 | 440 | 880 |
| 0.460 | 43.8 | 87.6 | 175 | 263 | 438 | 876 |
| 0.461 | 43.6 | 87.3 | 174 | 262 | 436 | 873 |
| 0.462 | 43.4 | 86.9 | 174 | 261 | 434 | 869 |
| 0.463 | 43.3 | 86.5 | 173 | 260 | 433 | 865 |
| 0.464 | 43.1 | 86.1 | 172 | 258 | 431 | 861 |
| 0.465 | 42.9 | 85.8 | 171 | 257 | 429 | 858 |
| 0.466 | 42.7 | 85.4 | 171 | 256 | 427 | 854 |
| 0.467 | 42.5 | 85.0 | 170 | 255 | 425 | 850 |
| 0.468 | 42.3 | 84.7 | 169 | 254 | 423 | 847 |
| 0.469 | 42.2 | 84.3 | 169 | 253 | 422 | 843 |
| 0.470 | 42.0 | 84.0 | 168 | 252 | 420 | 840 |
| 0.471 | 41.8 | 83.6 | 167 | 251 | 418 | 836 |
| 0.472 | 41.6 | 83.2 | 166 | 250 | 416 | 832 |
| 0.473 | 41.4 | 82.9 | 166 | 249 | 414 | 829 |
| 0.474 | 41.3 | 82.5 | 165 | 248 | 413 | 825 |
| 0.475 | 41.1 | 82.2 | 164 | 247 | 411 | 822 |
| 0.476 | 40.9 | 81.8 | 164 | 246 | 409 | 818 |
| 0.477 | 40.7 | 81.5 | 163 | 245 | 407 | 815 |
| 0.478 | 40.6 | 81.2 | 162 | 243 | 406 | 812 |
| 0.479 | 40.4 | 80.8 | 162 | 242 | 404 | 808 |
| 0.480 | 40.2 | 80.5 | 161 | 241 | 402 | 805 |
| 0.481 | 40.1 | 80.2 | 160 | 240 | 401 | 802 |
| 0.482 | 39.9 | 79.8 | 160 | 239 | 399 | 798 |
| 0.483 | 39.7 | 79.5 | 159 | 238 | 397 | 795 |
| 0.484 | 39.6 | 79.2 | 158 | 237 | 396 | 792 |
| 0.485 | 39.4 | 78.8 | 158 | 237 | 394 | 788 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.486 | 39.3 | 78.5 | 157 | 236 | 393 | 785 |
| 0.487 | 39.1 | 78.2 | 156 | 235 | 391 | 782 |
| 0.488 | 38.9 | 77.9 | 156 | 234 | 389 | 779 |
| 0.489 | 38.8 | 77.6 | 155 | 233 | 388 | 776 |
| 0.490 | 38.6 | 77.2 | 154 | 232 | 386 | 772 |
| 0.491 | 38.5 | 76.9 | 154 | 231 | 385 | 769 |
| 0.492 | 38.3 | 76.6 | 153 | 230 | 383 | 766 |
| 0.493 | 38.1 | 76.3 | 153 | 229 | 381 | 763 |
| 0.494 | 38.0 | 76.0 | 152 | 228 | 380 | 760 |
| 0.495 | 37.8 | 75.7 | 151 | 227 | 378 | 757 |
| 0.496 | 37.7 | 75.4 | 151 | 226 | 377 | 754 |
| 0.497 | 37.5 | 75.1 | 150 | 225 | 375 | 751 |
| 0.498 | 37.4 | 74.8 | 150 | 224 | 374 | 748 |
| 0.499 | 37.2 | 74.5 | 149 | 223 | 372 | 745 |
| 0.500 | 37.1 | 74.2 | 148 | 223 | 371 | 742 |
| 0.501 | 36.9 | 73.9 | 148 | 222 | 369 | 739 |
| 0.502 | 36.8 | 73.6 | 147 | 221 | 368 | 736 |
| 0.503 | 36.6 | 73.3 | 147 | 220 | 366 | 733 |
| 0.504 | 36.5 | 73.0 | 146 | 219 | 365 | 730 |
| 0.505 | 36.4 | 72.7 | 145 | 218 | 364 | 727 |
| 0.506 | 36.2 | 72.4 | 145 | 217 | 362 | 724 |
| 0.507 | 36.1 | 72.1 | 144 | 216 | 361 | 721 |
| 0.508 | 35.9 | 71.9 | 144 | 216 | 359 | 719 |
| 0.509 | 35.8 | 71.6 | 143 | 215 | 358 | 716 |
| 0.510 | 35.6 | 71.3 | 143 | 214 | 356 | 713 |
| 0.511 | 35.5 | 71.0 | 142 | 213 | 355 | 710 |
| 0.512 | 35.4 | 70.7 | 141 | 212 | 354 | 707 |
| 0.513 | 35.2 | 70.5 | 141 | 211 | 352 | 705 |
| 0.514 | 35.1 | 70.2 | 140 | 211 | 351 | 702 |
| 0.515 | 35.0 | 69.9 | 140 | 210 | 350 | 699 |
| 0.516 | 34.8 | 69.7 | 139 | 209 | 348 | 697 |
| 0.517 | 34.7 | 69.4 | 139 | 208 | 347 | 694 |
| 0.518 | 34.6 | 69.1 | 138 | 207 | 346 | 691 |
| 0.519 | 34.4 | 68.8 | 138 | 207 | 344 | 688 |
| 0.520 | 34.3 | 68.6 | 137 | 206 | 343 | 686 |
| 0.521 | 34.2 | 68.3 | 137 | 205 | 342 | 683 |
| 0.522 | 34.0 | 68.1 | 136 | 204 | 340 | 681 |
| 0.523 | 33.9 | 67.8 | 136 | 203 | 339 | 678 |
| 0.524 | 33.8 | 67.5 | 135 | 203 | 338 | 675 |
| 0.525 | 33.6 | 67.3 | 135 | 202 | 336 | 673 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.526 | 33.5 | 67.0 | 134 | 201 | 335 | 670 |
| 0.527 | 33.4 | 66.8 | 134 | 200 | 334 | 668 |
| 0.528 | 33.3 | 66.5 | 133 | 200 | 333 | 665 |
| 0.529 | 33.1 | 66.3 | 133 | 199 | 331 | 663 |
| 0.530 | 33.0 | 66.0 | 132 | 198 | 330 | 660 |
| 0.531 | 32.9 | 65.8 | 132 | 197 | 329 | 658 |
| 0.532 | 32.8 | 65.5 | 131 | 197 | 328 | 655 |
| 0.533 | 32.6 | 65.3 | 131 | 196 | 326 | 653 |
| 0.534 | 32.5 | 65.0 | 130 | 195 | 325 | 650 |
| 0.535 | 32.4 | 64.8 | 130 | 194 | 324 | 648 |
| 0.536 | 32.3 | 64.6 | 129 | 194 | 323 | 646 |
| 0.537 | 32.2 | 64.3 | 129 | 193 | 322 | 643 |
| 0.538 | 32.0 | 64.1 | 128 | 192 | 320 | 641 |
| 0.539 | 31.9 | 63.8 | 128 | 191 | 319 | 638 |
| 0.540 | 31.8 | 63.6 | 127 | 191 | 318 | 636 |
| 0.541 | 31.7 | 63.4 | 127 | 190 | 317 | 634 |
| 0.542 | 31.6 | 63.1 | 126 | 189 | 316 | 631 |
| 0.543 | 31.4 | 62.9 | 126 | 189 | 314 | 629 |
| 0.544 | 31.3 | 62.7 | 125 | 188 | 313 | 627 |
| 0.545 | 31.2 | 62.4 | 125 | 187 | 312 | 624 |
| 0.546 | 31.1 | 62.2 | 124 | 187 | 311 | 622 |
| 0.547 | 31.0 | 62.0 | 124 | 186 | 310 | 620 |
| 0.548 | 30.9 | 61.8 | 123 | 185 | 309 | 618 |
| 0.549 | 30.8 | 61.5 | 123 | 185 | 308 | 615 |
| 0.550 | 30.6 | 61.3 | 123 | 184 | 306 | 613 |
| 0.551 | 30.5 | 61.1 | 122 | 183 | 305 | 611 |
| 0.552 | 30.4 | 60.9 | 122 | 183 | 304 | 609 |
| 0.553 | 30.3 | 60.6 | 121 | 182 | 303 | 606 |
| 0.554 | 30.2 | 60.4 | 121 | 181 | 302 | 604 |
| 0.555 | 30.1 | 60.2 | 120 | 181 | 301 | 602 |
| 0.556 | 30.0 | 60.0 | 120 | 180 | 300 | 600 |
| 0.557 | 29.9 | 59.8 | 120 | 179 | 299 | 598 |
| 0.558 | 29.8 | 59.6 | 119 | 179 | 298 | 596 |
| 0.559 | 29.7 | 59.3 | 119 | 178 | 297 | 593 |
| 0.560 | 29.6 | 59.1 | 118 | 177 | 296 | 591 |
| 0.561 | 29.5 | 58.9 | 118 | 177 | 295 | 589 |
| 0.562 | 29.4 | 58.7 | 117 | 176 | 294 | 587 |
| 0.563 | 29.3 | 58.5 | 117 | 176 | 293 | 585 |
| 0.564 | 29.1 | 58.3 | 117 | 175 | 291 | 583 |
| 0.565 | 29.0 | 58.1 | 116 | 174 | 290 | 581 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.566 | 28.9 | 57.9 | 116 | 174 | 289 | 579 |
| 0.567 | 28.8 | 57.7 | 115 | 173 | 288 | 577 |
| 0.568 | 28.7 | 57.5 | 115 | 172 | 287 | 575 |
| 0.569 | 28.6 | 57.3 | 115 | 172 | 286 | 573 |
| 0.570 | 28.5 | 57.1 | 114 | 171 | 285 | 571 |
| 0.571 | 28.4 | 56.9 | 114 | 171 | 284 | 569 |
| 0.572 | 28.3 | 56.7 | 113 | 170 | 283 | 567 |
| 0.573 | 28.2 | 56.5 | 113 | 169 | 282 | 565 |
| 0.574 | 28.1 | 56.3 | 113 | 169 | 281 | 563 |
| 0.575 | 28.0 | 56.1 | 112 | 168 | 280 | 561 |
| 0.576 | 27.9 | 55.9 | 112 | 168 | 279 | 559 |
| 0.577 | 27.8 | 55.7 | 111 | 167 | 278 | 557 |
| 0.578 | 27.8 | 55.5 | 111 | 167 | 278 | 555 |
| 0.579 | 27.7 | 55.3 | 111 | 166 | 277 | 553 |
| 0.580 | 27.6 | 55.1 | 110 | 165 | 276 | 551 |
| 0.581 | 27.5 | 54.9 | 110 | 165 | 275 | 549 |
| 0.582 | 27.4 | 54.7 | 109 | 164 | 274 | 547 |
| 0.583 | 27.3 | 54.6 | 109 | 164 | 273 | 546 |
| 0.584 | 27.2 | 54.4 | 109 | 163 | 272 | 544 |
| 0.585 | 27.1 | 54.2 | 108 | 163 | 271 | 542 |
| 0.586 | 27.0 | 54.0 | 108 | 162 | 270 | 540 |
| 0.587 | 26.9 | 53.8 | 108 | 161 | 269 | 538 |
| 0.588 | 26.8 | 53.6 | 107 | 161 | 268 | 536 |
| 0.589 | 26.7 | 53.5 | 107 | 160 | 267 | 535 |
| 0.590 | 26.6 | 53.3 | 107 | 160 | 266 | 533 |
| 0.591 | 26.5 | 53.1 | 106 | 159 | 265 | 531 |
| 0.592 | 26.5 | 52.9 | 106 | 159 | 265 | 529 |
| 0.593 | 26.4 | 52.7 | 105 | 158 | 264 | 527 |
| 0.594 | 26.3 | 52.6 | 105 | 158 | 263 | 526 |
| 0.595 | 26.2 | 52.4 | 105 | 157 | 262 | 524 |
| 0.596 | 26.1 | 52.2 | 104 | 157 | 261 | 522 |
| 0.597 | 26.0 | 52.0 | 104 | 156 | 260 | 520 |
| 0.598 | 25.9 | 51.9 | 104 | 156 | 259 | 519 |
| 0.599 | 25.8 | 51.7 | 103 | 155 | 258 | 517 |
| 0.600 | 25.8 | 51.5 | 103 | 155 | 258 | 515 |
| 0.601 | 25.7 | 51.3 | 103 | 154 | 257 | 513 |
| 0.602 | 25.6 | 51.2 | 102 | 154 | 256 | 512 |
| 0.603 | 25.5 | 51.0 | 102 | 153 | 255 | 510 |
| 0.604 | 25.4 | 50.8 | 102 | 152 | 254 | 508 |
| 0.605 | 25.3 | 50.7 | 101 | 152 | 253 | 507 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.606 | 25.2 | 50.5 | 101 | 151 | 252 | 505 |
| 0.607 | 25.2 | 50.3 | 101 | 151 | 252 | 503 |
| 0.608 | 25.1 | 50.2 | 100 | 150 | 251 | 502 |
| 0.609 | 25.0 | 50.0 | 100.0 | 150 | 250 | 500 |
| 0.610 | 24.9 | 49.8 | 99.7 | 150 | 249 | 498 |
| 0.611 | 24.8 | 49.7 | 99.3 | 149 | 248 | 497 |
| 0.612 | 24.8 | 49.5 | 99.0 | 149 | 248 | 495 |
| 0.613 | 24.7 | 49.4 | 98.7 | 148 | 247 | 494 |
| 0.614 | 24.6 | 49.2 | 98.4 | 148 | 246 | 492 |
| 0.615 | 24.5 | 49.0 | 98.0 | 147 | 245 | 490 |
| 0.616 | 24.4 | 48.9 | 97.7 | 147 | 244 | 489 |
| 0.617 | 24.4 | 48.7 | 97.4 | 146 | 244 | 487 |
| 0.618 | 24.3 | 48.6 | 97.1 | 146 | 243 | 486 |
| 0.619 | 24.2 | 48.4 | 96.8 | 145 | 242 | 484 |
| 0.620 | 24.1 | 48.2 | 96.5 | 145 | 241 | 482 |
| 0.621 | 24.0 | 48.1 | 96.2 | 144 | 240 | 481 |
| 0.622 | 24.0 | 47.9 | 95.8 | 144 | 240 | 479 |
| 0.623 | 23.9 | 47.8 | 95.5 | 143 | 239 | 478 |
| 0.624 | 23.8 | 47.6 | 95.2 | 143 | 238 | 476 |
| 0.625 | 23.7 | 47.5 | 94.9 | 142 | 237 | 475 |
| 0.626 | 23.7 | 47.3 | 94.6 | 142 | 237 | 473 |
| 0.627 | 23.6 | 47.2 | 94.3 | 142 | 236 | 472 |
| 0.628 | 23.5 | 47.0 | 94.0 | 141 | 235 | 470 |
| 0.629 | 23.4 | 46.9 | 93.7 | 141 | 234 | 469 |
| 0.630 | 23.4 | 46.7 | 93.4 | 140 | 234 | 467 |
| 0.631 | 23.3 | 46.6 | 93.1 | 140 | 233 | 466 |
| 0.632 | 23.2 | 46.4 | 92.8 | 139 | 232 | 464 |
| 0.633 | 23.1 | 46.3 | 92.5 | 139 | 231 | 463 |
| 0.634 | 23.1 | 46.1 | 92.3 | 138 | 231 | 461 |
| 0.635 | 23.0 | 46.0 | 92.0 | 138 | 230 | 460 |
| 0.636 | 22.9 | 45.8 | 91.7 | 138 | 229 | 458 |
| 0.637 | 22.8 | 45.7 | 91.4 | 137 | 228 | 457 |
| 0.638 | 22.8 | 45.6 | 91.1 | 137 | 228 | 456 |
| 0.639 | 22.7 | 45.4 | 90.8 | 136 | 227 | 454 |
| 0.640 | 22.6 | 45.3 | 90.5 | 136 | 226 | 453 |
| 0.641 | 22.6 | 45.1 | 90.3 | 135 | 226 | 451 |
| 0.642 | 22.5 | 45.0 | 90.0 | 135 | 225 | 450 |
| 0.643 | 22.4 | 44.9 | 89.7 | 135 | 224 | 449 |
| 0.644 | 22.4 | 44.7 | 89.4 | 134 | 224 | 447 |
| 0.645 | 22.3 | 44.6 | 89.1 | 134 | 223 | 446 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.646 | 22.2 | 44.4 | 88.9 | 133 | 222 | 444 |
| 0.647 | 22.1 | 44.3 | 88.6 | 133 | 221 | 443 |
| 0.648 | 22.1 | 44.2 | 88.3 | 132 | 221 | 442 |
| 0.649 | 22.0 | 44.0 | 88.0 | 132 | 220 | 440 |
| 0.650 | 21.9 | 43.9 | 87.8 | 132 | 219 | 439 |
| 0.651 | 21.9 | 43.8 | 87.5 | 131 | 219 | 438 |
| 0.652 | 21.8 | 43.6 | 87.2 | 131 | 218 | 436 |
| 0.653 | 21.7 | 43.5 | 87.0 | 130 | 217 | 435 |
| 0.654 | 21.7 | 43.4 | 86.7 | 130 | 217 | 434 |
| 0.655 | 21.6 | 43.2 | 86.4 | 130 | 216 | 432 |
| 0.656 | 21.5 | 43.1 | 86.2 | 129 | 215 | 431 |
| 0.657 | 21.5 | 43.0 | 85.9 | 129 | 215 | 430 |
| 0.658 | 21.4 | 42.8 | 85.6 | 128 | 214 | 428 |
| 0.659 | 21.3 | 42.7 | 85.4 | 128 | 213 | 427 |
| 0.660 | 21.3 | 42.6 | 85.1 | 128 | 213 | 426 |
| 0.661 | 21.2 | 42.4 | 84.9 | 127 | 212 | 424 |
| 0.662 | 21.2 | 42.3 | 84.6 | 127 | 212 | 423 |
| 0.663 | 21.1 | 42.2 | 84.4 | 127 | 211 | 422 |
| 0.664 | 21.0 | 42.1 | 84.1 | 126 | 210 | 421 |
| 0.665 | 21.0 | 41.9 | 83.9 | 126 | 210 | 419 |
| 0.666 | 20.9 | 41.8 | 83.6 | 125 | 209 | 418 |
| 0.667 | 20.8 | 41.7 | 83.4 | 125 | 208 | 417 |
| 0.668 | 20.8 | 41.6 | 83.1 | 125 | 208 | 416 |
| 0.669 | 20.7 | 41.4 | 82.9 | 124 | 207 | 414 |
| 0.670 | 20.7 | 41.3 | 82.6 | 124 | 207 | 413 |
| 0.671 | 20.6 | 41.2 | 82.4 | 124 | 206 | 412 |
| 0.672 | 20.5 | 41.1 | 82.1 | 123 | 205 | 411 |
| 0.673 | 20.5 | 40.9 | 81.9 | 123 | 205 | 409 |
| 0.674 | 20.4 | 40.8 | 81.6 | 122 | 204 | 408 |
| 0.675 | 20.3 | 40.7 | 81.4 | 122 | 203 | 407 |
| 0.676 | 20.3 | 40.6 | 81.1 | 122 | 203 | 406 |
| 0.677 | 20.2 | 40.5 | 80.9 | 121 | 202 | 405 |
| 0.678 | 20.2 | 40.3 | 80.7 | 121 | 202 | 403 |
| 0.679 | 20.1 | 40.2 | 80.4 | 121 | 201 | 402 |
| 0.680 | 20.1 | 40.1 | 80.2 | 120 | 201 | 401 |
| 0.681 | 20.0 | 40.0 | 80.0 | 120 | 200 | 400 |
| 0.682 | 19.9 | 39.9 | 79.7 | 120 | 199 | 399 |
| 0.683 | 19.9 | 39.8 | 79.5 | 119 | 199 | 398 |
| 0.684 | 19.8 | 39.6 | 79.3 | 119 | 198 | 396 |
| 0.685 | 19.8 | 39.5 | 79.0 | 119 | 198 | 395 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.686 | 19.7 | 39.4 | 78.8 | 118 | 197 | 394 |
| 0.687 | 19.6 | 39.3 | 78.6 | 118 | 196 | 393 |
| 0.688 | 19.6 | 39.2 | 78.3 | 118 | 196 | 392 |
| 0.689 | 19.5 | 39.1 | 78.1 | 117 | 195 | 391 |
| 0.690 | 19.5 | 39.0 | 77.9 | 117 | 195 | 390 |
| 0.691 | 19.4 | 38.8 | 77.7 | 117 | 194 | 388 |
| 0.692 | 19.4 | 38.7 | 77.4 | 116 | 194 | 387 |
| 0.693 | 19.3 | 38.6 | 77.2 | 116 | 193 | 386 |
| 0.694 | 19.3 | 38.5 | 77.0 | 116 | 193 | 385 |
| 0.695 | 19.2 | 38.4 | 76.8 | 115 | 192 | 384 |
| 0.696 | 19.1 | 38.3 | 76.6 | 115 | 191 | 383 |
| 0.697 | 19.1 | 38.2 | 76.3 | 115 | 191 | 382 |
| 0.698 | 19.0 | 38.1 | 76.1 | 114 | 190 | 381 |
| 0.699 | 19.0 | 38.0 | 75.9 | 114 | 190 | 380 |
| 0.700 | 18.9 | 37.8 | 75.7 | 114 | 189 | 378 |
| 0.701 | 18.9 | 37.7 | 75.5 | 113 | 189 | 377 |
| 0.702 | 18.8 | 37.6 | 75.2 | 113 | 188 | 376 |
| 0.703 | 18.8 | 37.5 | 75.0 | 113 | 188 | 375 |
| 0.704 | 18.7 | 37.4 | 74.8 | 112 | 187 | 374 |
| 0.705 | 18.7 | 37.3 | 74.6 | 112 | 187 | 373 |
| 0.706 | 18.6 | 37.2 | 74.4 | 112 | 186 | 372 |
| 0.707 | 18.5 | 37.1 | 74.2 | 111 | 185 | 371 |
| 0.708 | 18.5 | 37.0 | 74.0 | 111 | 185 | 370 |
| 0.709 | 18.4 | 36.9 | 73.8 | 111 | 184 | 369 |
| 0.710 | 18.4 | 36.8 | 73.6 | 110 | 184 | 368 |
| 0.711 | 18.3 | 36.7 | 73.4 | 110 | 183 | 367 |
| 0.712 | 18.3 | 36.6 | 73.1 | 110 | 183 | 366 |
| 0.713 | 18.2 | 36.5 | 72.9 | 109 | 182 | 365 |
| 0.714 | 18.2 | 36.4 | 72.7 | 109 | 182 | 364 |
| 0.715 | 18.1 | 36.3 | 72.5 | 109 | 181 | 363 |
| 0.716 | 18.1 | 36.2 | 72.3 | 109 | 181 | 362 |
| 0.717 | 18.0 | 36.1 | 72.1 | 108 | 180 | 361 |
| 0.718 | 18.0 | 36.0 | 71.9 | 108 | 180 | 360 |
| 0.719 | 17.9 | 35.9 | 71.7 | 108 | 179 | 359 |
| 0.720 | 17.9 | 35.8 | 71.5 | 107 | 179 | 358 |
| 0.721 | 17.8 | 35.7 | 71.3 | 107 | 178 | 357 |
| 0.722 | 17.8 | 35.6 | 71.1 | 107 | 178 | 356 |
| 0.723 | 17.7 | 35.5 | 70.9 | 106 | 177 | 355 |
| 0.724 | 17.7 | 35.4 | 70.7 | 106 | 177 | 354 |
| 0.725 | 17.6 | 35.3 | 70.5 | 106 | 176 | 353 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.726 | 17.6 | 35.2 | 70.4 | 106 | 176 | 352 |
| 0.727 | 17.5 | 35.1 | 70.2 | 105 | 175 | 351 |
| 0.728 | 17.5 | 35.0 | 70.0 | 105 | 175 | 350 |
| 0.729 | 17.4 | 34.9 | 69.8 | 105 | 174 | 349 |
| 0.730 | 17.4 | 34.8 | 69.6 | 104 | 174 | 348 |
| 0.731 | 17.4 | 34.7 | 69.4 | 104 | 174 | 347 |
| 0.732 | 17.3 | 34.6 | 69.2 | 104 | 173 | 346 |
| 0.733 | 17.3 | 34.5 | 69.0 | 104 | 173 | 345 |
| 0.734 | 17.2 | 34.4 | 68.8 | 103 | 172 | 344 |
| 0.735 | 17.2 | 34.3 | 68.6 | 103 | 172 | 343 |
| 0.736 | 17.1 | 34.2 | 68.5 | 103 | 171 | 342 |
| 0.737 | 17.1 | 34.1 | 68.3 | 102 | 171 | 341 |
| 0.738 | 17.0 | 34.0 | 68.1 | 102 | 170 | 340 |
| 0.739 | 17.0 | 34.0 | 67.9 | 102 | 170 | 340 |
| 0.740 | 16.9 | 33.9 | 67.7 | 102 | 169 | 339 |
| 0.741 | 16.9 | 33.8 | 67.5 | 101 | 169 | 338 |
| 0.742 | 16.8 | 33.7 | 67.4 | 101 | 168 | 337 |
| 0.743 | 16.8 | 33.6 | 67.2 | 101 | 168 | 336 |
| 0.744 | 16.7 | 33.5 | 67.0 | 101 | 167 | 335 |
| 0.745 | 16.7 | 33.4 | 66.8 | 100 | 167 | 334 |
| 0.746 | 16.7 | 33.3 | 66.6 | 100 | 167 | 333 |
| 0.747 | 16.6 | 33.2 | 66.5 | 99.7 | 166 | 332 |
| 0.748 | 16.6 | 33.1 | 66.3 | 99.4 | 166 | 331 |
| 0.749 | 16.5 | 33.1 | 66.1 | 99.2 | 165 | 331 |
| 0.750 | 16.5 | 33.0 | 65.9 | 98.9 | 165 | 330 |
| 0.751 | 16.4 | 32.9 | 65.7 | 98.6 | 164 | 329 |
| 0.752 | 16.4 | 32.8 | 65.6 | 98.4 | 164 | 328 |
| 0.753 | 16.4 | 32.7 | 65.4 | 98.1 | 164 | 327 |
| 0.754 | 16.3 | 32.6 | 65.2 | 97.9 | 163 | 326 |
| 0.755 | 16.3 | 32.5 | 65.1 | 97.6 | 163 | 325 |
| 0.756 | 16.2 | 32.4 | 64.9 | 97.3 | 162 | 324 |
| 0.757 | 16.2 | 32.4 | 64.7 | 97.1 | 162 | 324 |
| 0.758 | 16.1 | 32.3 | 64.5 | 96.8 | 161 | 323 |
| 0.759 | 16.1 | 32.2 | 64.4 | 96.6 | 161 | 322 |
| 0.760 | 16.1 | 32.1 | 64.2 | 96.3 | 161 | 321 |
| 0.761 | 16.0 | 32.0 | 64.0 | 96.1 | 160 | 320 |
| 0.762 | 16.0 | 31.9 | 63.9 | 95.8 | 160 | 319 |
| 0.763 | 15.9 | 31.9 | 63.7 | 95.6 | 159 | 319 |
| 0.764 | 15.9 | 31.8 | 63.5 | 95.3 | 159 | 318 |
| 0.765 | 15.8 | 31.7 | 63.4 | 95.1 | 158 | 317 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.766 | 15.8 | 31.6 | 63.2 | 94.8 | 158 | 316 |
| 0.767 | 15.8 | 31.5 | 63.0 | 94.6 | 158 | 315 |
| 0.768 | 15.7 | 31.4 | 62.9 | 94.3 | 157 | 314 |
| 0.769 | 15.7 | 31.4 | 62.7 | 94.1 | 157 | 314 |
| 0.770 | 15.6 | 31.3 | 62.5 | 93.8 | 156 | 313 |
| 0.771 | 15.6 | 31.2 | 62.4 | 93.6 | 156 | 312 |
| 0.772 | 15.6 | 31.1 | 62.2 | 93.3 | 156 | 311 |
| 0.773 | 15.5 | 31.0 | 62.1 | 93.1 | 155 | 310 |
| 0.774 | 15.5 | 31.0 | 61.9 | 92.9 | 155 | 310 |
| 0.775 | 15.4 | 30.9 | 61.7 | 92.6 | 154 | 309 |
| 0.776 | 15.4 | 30.8 | 61.6 | 92.4 | 154 | 308 |
| 0.777 | 15.4 | 30.7 | 61.4 | 92.1 | 154 | 307 |
| 0.778 | 15.3 | 30.6 | 61.3 | 91.9 | 153 | 306 |
| 0.779 | 15.3 | 30.6 | 61.1 | 91.7 | 153 | 306 |
| 0.780 | 15.2 | 30.5 | 61.0 | 91.4 | 152 | 305 |
| 0.781 | 15.2 | 30.4 | 60.8 | 91.2 | 152 | 304 |
| 0.782 | 15.2 | 30.3 | 60.6 | 91.0 | 152 | 303 |
| 0.783 | 15.1 | 30.2 | 60.5 | 90.7 | 151 | 302 |
| 0.784 | 15.1 | 30.2 | 60.3 | 90.5 | 151 | 302 |
| 0.785 | 15.0 | 30.1 | 60.2 | 90.3 | 150 | 301 |
| 0.786 | 15.0 | 30.0 | 60.0 | 90.1 | 150 | 300 |
| 0.787 | 15.0 | 29.9 | 59.9 | 89.8 | 150 | 299 |
| 0.788 | 14.9 | 29.9 | 59.7 | 89.6 | 149 | 299 |
| 0.789 | 14.9 | 29.8 | 59.6 | 89.4 | 149 | 298 |
| 0.790 | 14.9 | 29.7 | 59.4 | 89.1 | 149 | 297 |
| 0.791 | 14.8 | 29.6 | 59.3 | 88.9 | 148 | 296 |
| 0.792 | 14.8 | 29.6 | 59.1 | 88.7 | 148 | 296 |
| 0.793 | 14.7 | 29.5 | 59.0 | 88.5 | 147 | 295 |
| 0.794 | 14.7 | 29.4 | 58.8 | 88.2 | 147 | 294 |
| 0.795 | 14.7 | 29.3 | 58.7 | 88.0 | 147 | 293 |
| 0.796 | 14.6 | 29.3 | 58.5 | 87.8 | 146 | 293 |
| 0.797 | 14.6 | 29.2 | 58.4 | 87.6 | 146 | 292 |
| 0.798 | 14.6 | 29.1 | 58.2 | 87.4 | 146 | 291 |
| 0.799 | 14.5 | 29.0 | 58.1 | 87.1 | 145 | 290 |
| 0.800 | 14.5 | 29.0 | 57.9 | 86.9 | 145 | 290 |
| 0.801 | 14.5 | 28.9 | 57.8 | 86.7 | 145 | 289 |
| 0.802 | 14.4 | 28.8 | 57.7 | 86.5 | 144 | 288 |
| 0.803 | 14.4 | 28.8 | 57.5 | 86.3 | 144 | 288 |
| 0.804 | 14.3 | 28.7 | 57.4 | 86.1 | 143 | 287 |
| 0.805 | 14.3 | 28.6 | 57.2 | 85.9 | 143 | 286 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.806 | 14.3 | 28.5 | 57.1 | 85.6 | 143 | 285 |
| 0.807 | 14.2 | 28.5 | 56.9 | 85.4 | 142 | 285 |
| 0.808 | 14.2 | 28.4 | 56.8 | 85.2 | 142 | 284 |
| 0.809 | 14.2 | 28.3 | 56.7 | 85.0 | 142 | 283 |
| 0.810 | 14.1 | 28.3 | 56.5 | 84.8 | 141 | 283 |
| 0.811 | 14.1 | 28.2 | 56.4 | 84.6 | 141 | 282 |
| 0.812 | 14.1 | 28.1 | 56.2 | 84.4 | 141 | 281 |
| 0.813 | 14.0 | 28.1 | 56.1 | 84.2 | 140 | 281 |
| 0.814 | 14.0 | 28.0 | 56.0 | 84.0 | 140 | 280 |
| 0.815 | 14.0 | 27.9 | 55.8 | 83.8 | 140 | 279 |
| 0.816 | 13.9 | 27.9 | 55.7 | 83.6 | 139 | 279 |
| 0.817 | 13.9 | 27.8 | 55.6 | 83.3 | 139 | 278 |
| 0.818 | 13.9 | 27.7 | 55.4 | 83.1 | 139 | 277 |
| 0.819 | 13.8 | 27.6 | 55.3 | 82.9 | 138 | 276 |
| 0.820 | 13.8 | 27.6 | 55.1 | 82.7 | 138 | 276 |
| 0.821 | 13.8 | 27.5 | 55.0 | 82.5 | 138 | 275 |
| 0.822 | 13.7 | 27.4 | 54.9 | 82.3 | 137 | 274 |
| 0.823 | 13.7 | 27.4 | 54.7 | 82.1 | 137 | 274 |
| 0.824 | 13.7 | 27.3 | 54.6 | 81.9 | 137 | 273 |
| 0.825 | 13.6 | 27.2 | 54.5 | 81.7 | 136 | 272 |
| 0.826 | 13.6 | 27.2 | 54.4 | 81.5 | 136 | 272 |
| 0.827 | 13.6 | 27.1 | 54.2 | 81.3 | 136 | 271 |
| 0.828 | 13.5 | 27.0 | 54.1 | 81.1 | 135 | 270 |
| 0.829 | 13.5 | 27.0 | 54.0 | 81.0 | 135 | 270 |
| 0.830 | 13.5 | 26.9 | 53.8 | 80.8 | 135 | 269 |
| 0.831 | 13.4 | 26.9 | 53.7 | 80.6 | 134 | 269 |
| 0.832 | 13.4 | 26.8 | 53.6 | 80.4 | 134 | 268 |
| 0.833 | 13.4 | 26.7 | 53.4 | 80.2 | 134 | 267 |
| 0.834 | 13.3 | 26.7 | 53.3 | 80.0 | 133 | 267 |
| 0.835 | 13.3 | 26.6 | 53.2 | 79.8 | 133 | 266 |
| 0.836 | 13.3 | 26.5 | 53.1 | 79.6 | 133 | 265 |
| 0.837 | 13.2 | 26.5 | 52.9 | 79.4 | 132 | 265 |
| 0.838 | 13.2 | 26.4 | 52.8 | 79.2 | 132 | 264 |
| 0.839 | 13.2 | 26.3 | 52.7 | 79.0 | 132 | 263 |
| 0.840 | 13.1 | 26.3 | 52.6 | 78.8 | 131 | 263 |
| 0.841 | 13.1 | 26.2 | 52.4 | 78.7 | 131 | 262 |
| 0.842 | 13.1 | 26.2 | 52.3 | 78.5 | 131 | 262 |
| 0.843 | 13.0 | 26.1 | 52.2 | 78.3 | 130 | 261 |
| 0.844 | 13.0 | 26.0 | 52.1 | 78.1 | 130 | 260 |
| 0.845 | 13.0 | 26.0 | 51.9 | 77.9 | 130 | 260 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.846 | 13.0 | 25.9 | 51.8 | 77.7 | 130 | 259 |
| 0.847 | 12.9 | 25.9 | 51.7 | 77.5 | 129 | 259 |
| 0.848 | 12.9 | 25.8 | 51.6 | 77.4 | 129 | 258 |
| 0.849 | 12.9 | 25.7 | 51.4 | 77.2 | 129 | 257 |
| 0.850 | 12.8 | 25.7 | 51.3 | 77.0 | 128 | 257 |
| 0.851 | 12.8 | 25.6 | 51.2 | 76.8 | 128 | 256 |
| 0.852 | 12.8 | 25.5 | 51.1 | 76.6 | 128 | 255 |
| 0.853 | 12.7 | 25.5 | 51.0 | 76.5 | 127 | 255 |
| 0.854 | 12.7 | 25.4 | 50.8 | 76.3 | 127 | 254 |
| 0.855 | 12.7 | 25.4 | 50.7 | 76.1 | 127 | 254 |
| 0.856 | 12.7 | 25.3 | 50.6 | 75.9 | 127 | 253 |
| 0.857 | 12.6 | 25.3 | 50.5 | 75.7 | 126 | 253 |
| 0.858 | 12.6 | 25.2 | 50.4 | 75.6 | 126 | 252 |
| 0.859 | 12.6 | 25.1 | 50.3 | 75.4 | 126 | 251 |
| 0.860 | 12.5 | 25.1 | 50.1 | 75.2 | 125 | 251 |
| 0.861 | 12.5 | 25.0 | 50.0 | 75.0 | 125 | 250 |
| 0.862 | 12.5 | 25.0 | 49.9 | 74.9 | 125 | 250 |
| 0.863 | 12.4 | 24.9 | 49.8 | 74.7 | 124 | 249 |
| 0.864 | 12.4 | 24.8 | 49.7 | 74.5 | 124 | 248 |
| 0.865 | 12.4 | 24.8 | 49.6 | 74.4 | 124 | 248 |
| 0.866 | 12.4 | 24.7 | 49.4 | 74.2 | 124 | 247 |
| 0.867 | 12.3 | 24.7 | 49.3 | 74.0 | 123 | 247 |
| 0.868 | 12.3 | 24.6 | 49.2 | 73.8 | 123 | 246 |
| 0.869 | 12.3 | 24.6 | 49.1 | 73.7 | 123 | 246 |
| 0.870 | 12.2 | 24.5 | 49.0 | 73.5 | 122 | 245 |
| 0.871 | 12.2 | 24.4 | 48.9 | 73.3 | 122 | 244 |
| 0.872 | 12.2 | 24.4 | 48.8 | 73.2 | 122 | 244 |
| 0.873 | 12.2 | 24.3 | 48.7 | 73.0 | 122 | 243 |
| 0.874 | 12.1 | 24.3 | 48.5 | 72.8 | 121 | 243 |
| 0.875 | 12.1 | 24.2 | 48.4 | 72.7 | 121 | 242 |
| 0.876 | 12.1 | 24.2 | 48.3 | 72.5 | 121 | 242 |
| 0.877 | 12.1 | 24.1 | 48.2 | 72.3 | 121 | 241 |
| 0.878 | 12.0 | 24.1 | 48.1 | 72.2 | 120 | 241 |
| 0.879 | 12.0 | 24.0 | 48.0 | 72.0 | 120 | 240 |
| 0.880 | 12.0 | 23.9 | 47.9 | 71.8 | 120 | 239 |
| 0.881 | 11.9 | 23.9 | 47.8 | 71.7 | 119 | 239 |
| 0.882 | 11.9 | 23.8 | 47.7 | 71.5 | 119 | 238 |
| 0.883 | 11.9 | 23.8 | 47.6 | 71.4 | 119 | 238 |
| 0.884 | 11.9 | 23.7 | 47.5 | 71.2 | 119 | 237 |
| 0.885 | 11.8 | 23.7 | 47.3 | 71.0 | 118 | 237 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.886 | 11.8 | 23.6 | 47.2 | 70.9 | 118 | 236 |
| 0.887 | 11.8 | 23.6 | 47.1 | 70.7 | 118 | 236 |
| 0.888 | 11.8 | 23.5 | 47.0 | 70.6 | 118 | 235 |
| 0.889 | 11.7 | 23.5 | 46.9 | 70.4 | 117 | 235 |
| 0.890 | 11.7 | 23.4 | 46.8 | 70.2 | 117 | 234 |
| 0.891 | 11.7 | 23.4 | 46.7 | 70.1 | 117 | 234 |
| 0.892 | 11.7 | 23.3 | 46.6 | 69.9 | 117 | 233 |
| 0.893 | 11.6 | 23.3 | 46.5 | 69.8 | 116 | 233 |
| 0.894 | 11.6 | 23.2 | 46.4 | 69.6 | 116 | 232 |
| 0.895 | 11.6 | 23.2 | 46.3 | 69.5 | 116 | 232 |
| 0.896 | 11.5 | 23.1 | 46.2 | 69.3 | 115 | 231 |
| 0.897 | 11.5 | 23.0 | 46.1 | 69.1 | 115 | 230 |
| 0.898 | 11.5 | 23.0 | 46.0 | 69.0 | 115 | 230 |
| 0.899 | 11.5 | 22.9 | 45.9 | 68.8 | 115 | 229 |
| 0.900 | 11.4 | 22.9 | 45.8 | 68.7 | 114 | 229 |
| 0.901 | 11.4 | 22.8 | 45.7 | 68.5 | 114 | 228 |
| 0.902 | 11.4 | 22.8 | 45.6 | 68.4 | 114 | 228 |
| 0.903 | 11.4 | 22.7 | 45.5 | 68.2 | 114 | 227 |
| 0.904 | 11.3 | 22.7 | 45.4 | 68.1 | 113 | 227 |
| 0.905 | 11.3 | 22.6 | 45.3 | 67.9 | 113 | 226 |
| 0.906 | 11.3 | 22.6 | 45.2 | 67.8 | 113 | 226 |
| 0.907 | 11.3 | 22.5 | 45.1 | 67.6 | 113 | 225 |
| 0.908 | 11.2 | 22.5 | 45.0 | 67.5 | 112 | 225 |
| 0.909 | 11.2 | 22.4 | 44.9 | 67.3 | 112 | 224 |
| 0.910 | 11.2 | 22.4 | 44.8 | 67.2 | 112 | 224 |
| 0.911 | 11.2 | 22.3 | 44.7 | 67.0 | 112 | 223 |
| 0.912 | 11.1 | 22.3 | 44.6 | 66.9 | 111 | 223 |
| 0.913 | 11.1 | 22.2 | 44.5 | 66.7 | 111 | 222 |
| 0.914 | 11.1 | 22.2 | 44.4 | 66.6 | 111 | 222 |
| 0.915 | 11.1 | 22.2 | 44.3 | 66.4 | 111 | 222 |
| 0.916 | 11.1 | 22.1 | 44.2 | 66.3 | 111 | 221 |
| 0.917 | 11.0 | 22.1 | 44.1 | 66.2 | 110 | 221 |
| 0.918 | 11.0 | 22.0 | 44.0 | 66.0 | 110 | 220 |
| 0.919 | 11.0 | 22.0 | 43.9 | 65.9 | 110 | 220 |
| 0.920 | 11.0 | 21.9 | 43.8 | 65.7 | 110 | 219 |
| 0.921 | 10.9 | 21.9 | 43.7 | 65.6 | 109 | 219 |
| 0.922 | 10.9 | 21.8 | 43.6 | 65.4 | 109 | 218 |
| 0.923 | 10.9 | 21.8 | 43.5 | 65.3 | 109 | 218 |
| 0.924 | 10.9 | 21.7 | 43.4 | 65.2 | 109 | 217 |
| 0.925 | 10.8 | 21.7 | 43.3 | 65.0 | 108 | 217 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.926 | 10.8 | 21.6 | 43.2 | 64.9 | 108 | 216 |
| 0.927 | 10.8 | 21.6 | 43.2 | 64.7 | 108 | 216 |
| 0.928 | 10.8 | 21.5 | 43.1 | 64.6 | 108 | 215 |
| 0.929 | 10.7 | 21.5 | 43.0 | 64.5 | 107 | 215 |
| 0.930 | 10.7 | 21.4 | 42.9 | 64.3 | 107 | 214 |
| 0.931 | 10.7 | 21.4 | 42.8 | 64.2 | 107 | 214 |
| 0.932 | 10.7 | 21.3 | 42.7 | 64.0 | 107 | 213 |
| 0.933 | 10.7 | 21.3 | 42.6 | 63.9 | 107 | 213 |
| 0.934 | 10.6 | 21.3 | 42.5 | 63.8 | 106 | 213 |
| 0.935 | 10.6 | 21.2 | 42.4 | 63.6 | 106 | 212 |
| 0.936 | 10.6 | 21.2 | 42.3 | 63.5 | 106 | 212 |
| 0.937 | 10.6 | 21.1 | 42.2 | 63.4 | 106 | 211 |
| 0.938 | 10.5 | 21.1 | 42.1 | 63.2 | 105 | 211 |
| 0.939 | 10.5 | 21.0 | 42.1 | 63.1 | 105 | 210 |
| 0.940 | 10.5 | 21.0 | 42.0 | 63.0 | 105 | 210 |
| 0.941 | 10.5 | 20.9 | 41.9 | 62.8 | 105 | 209 |
| 0.942 | 10.4 | 20.9 | 41.8 | 62.7 | 104 | 209 |
| 0.943 | 10.4 | 20.9 | 41.7 | 62.6 | 104 | 209 |
| 0.944 | 10.4 | 20.8 | 41.6 | 62.4 | 104 | 208 |
| 0.945 | 10.4 | 20.8 | 41.5 | 62.3 | 104 | 208 |
| 0.946 | 10.4 | 20.7 | 41.4 | 62.2 | 104 | 207 |
| 0.947 | 10.3 | 20.7 | 41.3 | 62.0 | 103 | 207 |
| 0.948 | 10.3 | 20.6 | 41.3 | 61.9 | 103 | 206 |
| 0.949 | 10.3 | 20.6 | 41.2 | 61.8 | 103 | 206 |
| 0.950 | 10.3 | 20.5 | 41.1 | 61.6 | 103 | 205 |
| 0.951 | 10.3 | 20.5 | 41.0 | 61.5 | 103 | 205 |
| 0.952 | 10.2 | 20.5 | 40.9 | 61.4 | 102 | 205 |
| 0.953 | 10.2 | 20.4 | 40.8 | 61.3 | 102 | 204 |
| 0.954 | 10.2 | 20.4 | 40.7 | 61.1 | 102 | 204 |
| 0.955 | 10.2 | 20.3 | 40.7 | 61.0 | 102 | 203 |
| 0.956 | 10.1 | 20.3 | 40.6 | 60.9 | 101 | 203 |
| 0.957 | 10.1 | 20.2 | 40.5 | 60.7 | 101 | 202 |
| 0.958 | 10.1 | 20.2 | 40.4 | 60.6 | 101 | 202 |
| 0.959 | 10.1 | 20.2 | 40.3 | 60.5 | 101 | 202 |
| 0.960 | 10.1 | 20.1 | 40.2 | 60.4 | 101 | 201 |
| 0.961 | 10.0 | 20.1 | 40.2 | 60.2 | 100 | 201 |
| 0.962 | 10.0 | 20.0 | 40.1 | 60.1 | 100 | 200 |
| 0.963 | 10.0 | 20.0 | 40.0 | 60.0 | 100 | 200 |
| 0.964 | 9.98 | 20.0 | 39.9 | 59.9 | 99.8 | 200 |
| 0.965 | 9.96 | 19.9 | 39.8 | 59.7 | 99.6 | 199 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 0.966 | 9.94 | 19.9 | 39.7 | 59.6 | 99.4 | 199 |
| 0.967 | 9.92 | 19.8 | 39.7 | 59.5 | 99.2 | 198 |
| 0.968 | 9.89 | 19.8 | 39.6 | 59.4 | 98.9 | 198 |
| 0.969 | 9.87 | 19.8 | 39.5 | 59.2 | 98.7 | 198 |
| 0.970 | 9.85 | 19.7 | 39.4 | 59.1 | 98.5 | 197 |
| 0.971 | 9.83 | 19.7 | 39.3 | 59.0 | 98.3 | 197 |
| 0.972 | 9.81 | 19.6 | 39.2 | 58.9 | 98.1 | 196 |
| 0.973 | 9.79 | 19.6 | 39.2 | 58.8 | 97.9 | 196 |
| 0.974 | 9.77 | 19.5 | 39.1 | 58.6 | 97.7 | 195 |
| 0.975 | 9.75 | 19.5 | 39.0 | 58.5 | 97.5 | 195 |
| 0.976 | 9.73 | 19.5 | 38.9 | 58.4 | 97.3 | 195 |
| 0.977 | 9.71 | 19.4 | 38.8 | 58.3 | 97.1 | 194 |
| 0.978 | 9.69 | 19.4 | 38.8 | 58.2 | 96.9 | 194 |
| 0.979 | 9.67 | 19.3 | 38.7 | 58.0 | 96.7 | 193 |
| 0.980 | 9.65 | 19.3 | 38.6 | 57.9 | 96.5 | 193 |
| 0.981 | 9.63 | 19.3 | 38.5 | 57.8 | 96.3 | 193 |
| 0.982 | 9.61 | 19.2 | 38.5 | 57.7 | 96.1 | 192 |
| 0.983 | 9.60 | 19.2 | 38.4 | 57.6 | 96.0 | 192 |
| 0.984 | 9.58 | 19.2 | 38.3 | 57.5 | 95.8 | 192 |
| 0.985 | 9.56 | 19.1 | 38.2 | 57.3 | 95.6 | 191 |
| 0.986 | 9.54 | 19.1 | 38.1 | 57.2 | 95.4 | 191 |
| 0.987 | 9.52 | 19.0 | 38.1 | 57.1 | 95.2 | 190 |
| 0.988 | 9.50 | 19.0 | 38.0 | 57.0 | 95.0 | 190 |
| 0.989 | 9.48 | 19.0 | 37.9 | 56.9 | 94.8 | 190 |
| 0.990 | 9.46 | 18.9 | 37.8 | 56.8 | 94.6 | 189 |
| 0.991 | 9.44 | 18.9 | 37.8 | 56.6 | 94.4 | 189 |
| 0.992 | 9.42 | 18.8 | 37.7 | 56.5 | 94.2 | 188 |
| 0.993 | 9.40 | 18.8 | 37.6 | 56.4 | 94.0 | 188 |
| 0.994 | 9.38 | 18.8 | 37.5 | 56.3 | 93.8 | 188 |
| 0.995 | 9.36 | 18.7 | 37.5 | 56.2 | 93.6 | 187 |
| 0.996 | 9.35 | 18.7 | 37.4 | 56.1 | 93.5 | 187 |
| 0.997 | 9.33 | 18.7 | 37.3 | 56.0 | 93.3 | 187 |
| 0.998 | 9.31 | 18.6 | 37.2 | 55.9 | 93.1 | 186 |
| 0.999 | 9.29 | 18.6 | 37.2 | 55.7 | 92.9 | 186 |
| 1.000 | 9.27 | 18.5 | 37.1 | 55.6 | 92.7 | 185 |
| 1.001 | 9.25 | 18.5 | 37.0 | 55.5 | 92.5 | 185 |
| 1.002 | 9.23 | 18.5 | 36.9 | 55.4 | 92.3 | 185 |
| 1.003 | 9.22 | 18.4 | 36.9 | 55.3 | 92.2 | 184 |
| 1.004 | 9.20 | 18.4 | 36.8 | 55.2 | 92.0 | 184 |
| 1.005 | 9.18 | 18.4 | 36.7 | 55.1 | 91.8 | 184 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.006 | 9.16 | 18.3 | 36.6 | 55.0 | 91.6 | 183 |
| 1.007 | 9.14 | 18.3 | 36.6 | 54.9 | 91.4 | 183 |
| 1.008 | 9.12 | 18.3 | 36.5 | 54.8 | 91.2 | 183 |
| 1.009 | 9.11 | 18.2 | 36.4 | 54.6 | 91.1 | 182 |
| 1.010 | 9.09 | 18.2 | 36.4 | 54.5 | 90.9 | 182 |
| 1.011 | 9.07 | 18.1 | 36.3 | 54.4 | 90.7 | 181 |
| 1.012 | 9.05 | 18.1 | 36.2 | 54.3 | 90.5 | 181 |
| 1.013 | 9.04 | 18.1 | 36.1 | 54.2 | 90.4 | 181 |
| 1.014 | 9.02 | 18.0 | 36.1 | 54.1 | 90.2 | 180 |
| 1.015 | 9.00 | 18.0 | 36.0 | 54.0 | 90.0 | 180 |
| 1.016 | 8.98 | 18.0 | 35.9 | 53.9 | 89.8 | 180 |
| 1.017 | 8.96 | 17.9 | 35.9 | 53.8 | 89.6 | 179 |
| 1.018 | 8.95 | 17.9 | 35.8 | 53.7 | 89.5 | 179 |
| 1.019 | 8.93 | 17.9 | 35.7 | 53.6 | 89.3 | 179 |
| 1.020 | 8.91 | 17.8 | 35.6 | 53.5 | 89.1 | 178 |
| 1.021 | 8.89 | 17.8 | 35.6 | 53.4 | 88.9 | 178 |
| 1.022 | 8.88 | 17.8 | 35.5 | 53.3 | 88.8 | 178 |
| 1.023 | 8.86 | 17.7 | 35.4 | 53.2 | 88.6 | 177 |
| 1.024 | 8.84 | 17.7 | 35.4 | 53.1 | 88.4 | 177 |
| 1.025 | 8.82 | 17.7 | 35.3 | 53.0 | 88.2 | 177 |
| 1.026 | 8.81 | 17.6 | 35.2 | 52.8 | 88.1 | 176 |
| 1.027 | 8.79 | 17.6 | 35.2 | 52.7 | 87.9 | 176 |
| 1.028 | 8.77 | 17.5 | 35.1 | 52.6 | 87.7 | 175 |
| 1.029 | 8.76 | 17.5 | 35.0 | 52.5 | 87.6 | 175 |
| 1.030 | 8.74 | 17.5 | 35.0 | 52.4 | 87.4 | 175 |
| 1.031 | 8.72 | 17.4 | 34.9 | 52.3 | 87.2 | 174 |
| 1.032 | 8.71 | 17.4 | 34.8 | 52.2 | 87.1 | 174 |
| 1.033 | 8.69 | 17.4 | 34.8 | 52.1 | 86.9 | 174 |
| 1.034 | 8.67 | 17.3 | 34.7 | 52.0 | 86.7 | 173 |
| 1.035 | 8.66 | 17.3 | 34.6 | 51.9 | 86.6 | 173 |
| 1.036 | 8.64 | 17.3 | 34.6 | 51.8 | 86.4 | 173 |
| 1.037 | 8.62 | 17.2 | 34.5 | 51.7 | 86.2 | 172 |
| 1.038 | 8.61 | 17.2 | 34.4 | 51.6 | 86.1 | 172 |
| 1.039 | 8.59 | 17.2 | 34.4 | 51.5 | 85.9 | 172 |
| 1.040 | 8.57 | 17.1 | 34.3 | 51.4 | 85.7 | 171 |
| 1.041 | 8.56 | 17.1 | 34.2 | 51.3 | 85.6 | 171 |
| 1.042 | 8.54 | 17.1 | 34.2 | 51.2 | 85.4 | 171 |
| 1.043 | 8.52 | 17.0 | 34.1 | 51.1 | 85.2 | 170 |
| 1.044 | 8.51 | 17.0 | 34.0 | 51.0 | 85.1 | 170 |
| 1.045 | 8.49 | 17.0 | 34.0 | 50.9 | 84.9 | 170 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.046 | 8.47 | 16.9 | 33.9 | 50.8 | 84.7 | 169 |
| 1.047 | 8.46 | 16.9 | 33.8 | 50.8 | 84.6 | 169 |
| 1.048 | 8.44 | 16.9 | 33.8 | 50.7 | 84.4 | 169 |
| 1.049 | 8.43 | 16.9 | 33.7 | 50.6 | 84.3 | 169 |
| 1.050 | 8.41 | 16.8 | 33.6 | 50.5 | 84.1 | 168 |
| 1.051 | 8.39 | 16.8 | 33.6 | 50.4 | 83.9 | 168 |
| 1.052 | 8.38 | 16.8 | 33.5 | 50.3 | 83.8 | 168 |
| 1.053 | 8.36 | 16.7 | 33.4 | 50.2 | 83.6 | 167 |
| 1.054 | 8.35 | 16.7 | 33.4 | 50.1 | 83.5 | 167 |
| 1.055 | 8.33 | 16.7 | 33.3 | 50.0 | 83.3 | 167 |
| 1.056 | 8.31 | 16.6 | 33.3 | 49.9 | 83.1 | 166 |
| 1.057 | 8.30 | 16.6 | 33.2 | 49.8 | 83.0 | 166 |
| 1.058 | 8.28 | 16.6 | 33.1 | 49.7 | 82.8 | 166 |
| 1.059 | 8.27 | 16.5 | 33.1 | 49.6 | 82.7 | 165 |
| 1.060 | 8.25 | 16.5 | 33.0 | 49.5 | 82.5 | 165 |
| 1.061 | 8.24 | 16.5 | 32.9 | 49.4 | 82.4 | 165 |
| 1.062 | 8.22 | 16.4 | 32.9 | 49.3 | 82.2 | 164 |
| 1.063 | 8.21 | 16.4 | 32.8 | 49.2 | 82.1 | 164 |
| 1.064 | 8.19 | 16.4 | 32.8 | 49.1 | 81.9 | 164 |
| 1.065 | 8.17 | 16.4 | 32.7 | 49.0 | 81.7 | 164 |
| 1.066 | 8.16 | 16.3 | 32.6 | 49.0 | 81.6 | 163 |
| 1.067 | 8.14 | 16.3 | 32.6 | 48.9 | 81.4 | 163 |
| 1.068 | 8.13 | 16.3 | 32.5 | 48.8 | 81.3 | 163 |
| 1.069 | 8.11 | 16.2 | 32.4 | 48.7 | 81.1 | 162 |
| 1.070 | 8.10 | 16.2 | 32.4 | 48.6 | 81.0 | 162 |
| 1.071 | 8.08 | 16.2 | 32.3 | 48.5 | 80.8 | 162 |
| 1.072 | 8.07 | 16.1 | 32.3 | 48.4 | 80.7 | 161 |
| 1.073 | 8.05 | 16.1 | 32.2 | 48.3 | 80.5 | 161 |
| 1.074 | 8.04 | 16.1 | 32.1 | 48.2 | 80.4 | 161 |
| 1.075 | 8.02 | 16.0 | 32.1 | 48.1 | 80.2 | 160 |
| 1.076 | 8.01 | 16.0 | 32.0 | 48.1 | 80.1 | 160 |
| 1.077 | 7.99 | 16.0 | 32.0 | 48.0 | 79.9 | 160 |
| 1.078 | 7.98 | 16.0 | 31.9 | 47.9 | 79.8 | 160 |
| 1.079 | 7.96 | 15.9 | 31.9 | 47.8 | 79.6 | 159 |
| 1.080 | 7.95 | 15.9 | 31.8 | 47.7 | 79.5 | 159 |
| 1.081 | 7.93 | 15.9 | 31.7 | 47.6 | 79.3 | 159 |
| 1.082 | 7.92 | 15.8 | 31.7 | 47.5 | 79.2 | 158 |
| 1.083 | 7.90 | 15.8 | 31.6 | 47.4 | 79.0 | 158 |
| 1.084 | 7.89 | 15.8 | 31.6 | 47.3 | 78.9 | 158 |
| 1.085 | 7.88 | 15.8 | 31.5 | 47.3 | 78.8 | 158 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.086 | 7.86 | 15.7 | 31.4 | 47.2 | 78.6 | 157 |
| 1.087 | 7.85 | 15.7 | 31.4 | 47.1 | 78.5 | 157 |
| 1.088 | 7.83 | 15.7 | 31.3 | 47.0 | 78.3 | 157 |
| 1.089 | 7.82 | 15.6 | 31.3 | 46.9 | 78.2 | 156 |
| 1.090 | 7.80 | 15.6 | 31.2 | 46.8 | 78.0 | 156 |
| 1.091 | 7.79 | 15.6 | 31.2 | 46.7 | 77.9 | 156 |
| 1.092 | 7.78 | 15.6 | 31.1 | 46.7 | 77.8 | 156 |
| 1.093 | 7.76 | 15.5 | 31.0 | 46.6 | 77.6 | 155 |
| 1.094 | 7.75 | 15.5 | 31.0 | 46.5 | 77.5 | 155 |
| 1.095 | 7.73 | 15.5 | 30.9 | 46.4 | 77.3 | 155 |
| 1.096 | 7.72 | 15.4 | 30.9 | 46.3 | 77.2 | 154 |
| 1.097 | 7.70 | 15.4 | 30.8 | 46.2 | 77.0 | 154 |
| 1.098 | 7.69 | 15.4 | 30.8 | 46.1 | 76.9 | 154 |
| 1.099 | 7.68 | 15.4 | 30.7 | 46.1 | 76.8 | 154 |
| 1.100 | 7.66 | 15.3 | 30.6 | 46.0 | 76.6 | 153 |
| 1.101 | 7.65 | 15.3 | 30.6 | 45.9 | 76.5 | 153 |
| 1.102 | 7.63 | 15.3 | 30.5 | 45.8 | 76.3 | 153 |
| 1.103 | 7.62 | 15.2 | 30.5 | 45.7 | 76.2 | 152 |
| 1.104 | 7.61 | 15.2 | 30.4 | 45.6 | 76.1 | 152 |
| 1.105 | 7.59 | 15.2 | 30.4 | 45.6 | 75.9 | 152 |
| 1.106 | 7.58 | 15.2 | 30.3 | 45.5 | 75.8 | 152 |
| 1.107 | 7.57 | 15.1 | 30.3 | 45.4 | 75.7 | 151 |
| 1.108 | 7.55 | 15.1 | 30.2 | 45.3 | 75.5 | 151 |
| 1.109 | 7.54 | 15.1 | 30.2 | 45.2 | 75.4 | 151 |
| 1.110 | 7.53 | 15.1 | 30.1 | 45.2 | 75.3 | 151 |
| 1.111 | 7.51 | 15.0 | 30.0 | 45.1 | 75.1 | 150 |
| 1.112 | 7.50 | 15.0 | 30.0 | 45.0 | 75.0 | 150 |
| 1.113 | 7.48 | 15.0 | 29.9 | 44.9 | 74.8 | 150 |
| 1.114 | 7.47 | 14.9 | 29.9 | 44.8 | 74.7 | 149 |
| 1.115 | 7.46 | 14.9 | 29.8 | 44.7 | 74.6 | 149 |
| 1.116 | 7.44 | 14.9 | 29.8 | 44.7 | 74.4 | 149 |
| 1.117 | 7.43 | 14.9 | 29.7 | 44.6 | 74.3 | 149 |
| 1.118 | 7.42 | 14.8 | 29.7 | 44.5 | 74.2 | 148 |
| 1.119 | 7.40 | 14.8 | 29.6 | 44.4 | 74.0 | 148 |
| 1.120 | 7.39 | 14.8 | 29.6 | 44.4 | 73.9 | 148 |
| 1.121 | 7.38 | 14.8 | 29.5 | 44.3 | 73.8 | 148 |
| 1.122 | 7.36 | 14.7 | 29.5 | 44.2 | 73.6 | 147 |
| 1.123 | 7.35 | 14.7 | 29.4 | 44.1 | 73.5 | 147 |
| 1.124 | 7.34 | 14.7 | 29.4 | 44.0 | 73.4 | 147 |
| 1.125 | 7.33 | 14.7 | 29.3 | 44.0 | 73.3 | 147 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.126 | 7.31 | 14.6 | 29.2 | 43.9 | 73.1 | 146 |
| 1.127 | 7.30 | 14.6 | 29.2 | 43.8 | 73.0 | 146 |
| 1.128 | 7.29 | 14.6 | 29.1 | 43.7 | 72.9 | 146 |
| 1.129 | 7.27 | 14.5 | 29.1 | 43.6 | 72.7 | 145 |
| 1.130 | 7.26 | 14.5 | 29.0 | 43.6 | 72.6 | 145 |
| 1.131 | 7.25 | 14.5 | 29.0 | 43.5 | 72.5 | 145 |
| 1.132 | 7.24 | 14.5 | 28.9 | 43.4 | 72.4 | 145 |
| 1.133 | 7.22 | 14.4 | 28.9 | 43.3 | 72.2 | 144 |
| 1.134 | 7.21 | 14.4 | 28.8 | 43.3 | 72.1 | 144 |
| 1.135 | 7.20 | 14.4 | 28.8 | 43.2 | 72.0 | 144 |
| 1.136 | 7.18 | 14.4 | 28.7 | 43.1 | 71.8 | 144 |
| 1.137 | 7.17 | 14.3 | 28.7 | 43.0 | 71.7 | 143 |
| 1.138 | 7.16 | 14.3 | 28.6 | 43.0 | 71.6 | 143 |
| 1.139 | 7.15 | 14.3 | 28.6 | 42.9 | 71.5 | 143 |
| 1.140 | 7.13 | 14.3 | 28.5 | 42.8 | 71.3 | 143 |
| 1.141 | 7.12 | 14.2 | 28.5 | 42.7 | 71.2 | 142 |
| 1.142 | 7.11 | 14.2 | 28.4 | 42.7 | 71.1 | 142 |
| 1.143 | 7.10 | 14.2 | 28.4 | 42.6 | 71.0 | 142 |
| 1.144 | 7.08 | 14.2 | 28.3 | 42.5 | 70.8 | 142 |
| 1.145 | 7.07 | 14.1 | 28.3 | 42.4 | 70.7 | 141 |
| 1.146 | 7.06 | 14.1 | 28.2 | 42.4 | 70.6 | 141 |
| 1.147 | 7.05 | 14.1 | 28.2 | 42.3 | 70.5 | 141 |
| 1.148 | 7.04 | 14.1 | 28.1 | 42.2 | 70.4 | 141 |
| 1.149 | 7.02 | 14.0 | 28.1 | 42.1 | 70.2 | 140 |
| 1.150 | 7.01 | 14.0 | 28.0 | 42.1 | 70.1 | 140 |
| 1.151 | 7.00 | 14.0 | 28.0 | 42.0 | 70.0 | 140 |
| 1.152 | 6.99 | 14.0 | 27.9 | 41.9 | 69.9 | 140 |
| 1.153 | 6.97 | 13.9 | 27.9 | 41.8 | 69.7 | 139 |
| 1.154 | 6.96 | 13.9 | 27.8 | 41.8 | 69.6 | 139 |
| 1.155 | 6.95 | 13.9 | 27.8 | 41.7 | 69.5 | 139 |
| 1.156 | 6.94 | 13.9 | 27.7 | 41.6 | 69.4 | 139 |
| 1.157 | 6.93 | 13.9 | 27.7 | 41.6 | 69.3 | 139 |
| 1.158 | 6.91 | 13.8 | 27.7 | 41.5 | 69.1 | 138 |
| 1.159 | 6.90 | 13.8 | 27.6 | 41.4 | 69.0 | 138 |
| 1.160 | 6.89 | 13.8 | 27.6 | 41.3 | 68.9 | 138 |
| 1.161 | 6.88 | 13.8 | 27.5 | 41.3 | 68.8 | 138 |
| 1.162 | 6.87 | 13.7 | 27.5 | 41.2 | 68.7 | 137 |
| 1.163 | 6.85 | 13.7 | 27.4 | 41.1 | 68.5 | 137 |
| 1.164 | 6.84 | 13.7 | 27.4 | 41.1 | 68.4 | 137 |
| 1.165 | 6.83 | 13.7 | 27.3 | 41.0 | 68.3 | 137 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.166 | 6.82 | 13.6 | 27.3 | 40.9 | 68.2 | 136 |
| 1.167 | 6.81 | 13.6 | 27.2 | 40.9 | 68.1 | 136 |
| 1.168 | 6.80 | 13.6 | 27.2 | 40.8 | 68.0 | 136 |
| 1.169 | 6.78 | 13.6 | 27.1 | 40.7 | 67.8 | 136 |
| 1.170 | 6.77 | 13.5 | 27.1 | 40.6 | 67.7 | 135 |
| 1.171 | 6.76 | 13.5 | 27.0 | 40.6 | 67.6 | 135 |
| 1.172 | 6.75 | 13.5 | 27.0 | 40.5 | 67.5 | 135 |
| 1.173 | 6.74 | 13.5 | 27.0 | 40.4 | 67.4 | 135 |
| 1.174 | 6.73 | 13.5 | 26.9 | 40.4 | 67.3 | 135 |
| 1.175 | 6.72 | 13.4 | 26.9 | 40.3 | 67.2 | 134 |
| 1.176 | 6.70 | 13.4 | 26.8 | 40.2 | 67.0 | 134 |
| 1.177 | 6.69 | 13.4 | 26.8 | 40.2 | 66.9 | 134 |
| 1.178 | 6.68 | 13.4 | 26.7 | 40.1 | 66.8 | 134 |
| 1.179 | 6.67 | 13.3 | 26.7 | 40.0 | 66.7 | 133 |
| 1.180 | 6.66 | 13.3 | 26.6 | 40.0 | 66.6 | 133 |
| 1.181 | 6.65 | 13.3 | 26.6 | 39.9 | 66.5 | 133 |
| 1.182 | 6.64 | 13.3 | 26.5 | 39.8 | 66.4 | 133 |
| 1.183 | 6.62 | 13.3 | 26.5 | 39.8 | 66.2 | 133 |
| 1.184 | 6.61 | 13.2 | 26.5 | 39.7 | 66.1 | 132 |
| 1.185 | 6.60 | 13.2 | 26.4 | 39.6 | 66.0 | 132 |
| 1.186 | 6.59 | 13.2 | 26.4 | 39.6 | 65.9 | 132 |
| 1.187 | 6.58 | 13.2 | 26.3 | 39.5 | 65.8 | 132 |
| 1.188 | 6.57 | 13.1 | 26.3 | 39.4 | 65.7 | 131 |
| 1.189 | 6.56 | 13.1 | 26.2 | 39.4 | 65.6 | 131 |
| 1.190 | 6.55 | 13.1 | 26.2 | 39.3 | 65.5 | 131 |
| 1.191 | 6.54 | 13.1 | 26.1 | 39.2 | 65.4 | 131 |
| 1.192 | 6.53 | 13.1 | 26.1 | 39.2 | 65.3 | 131 |
| 1.193 | 6.51 | 13.0 | 26.1 | 39.1 | 65.1 | 130 |
| 1.194 | 6.50 | 13.0 | 26.0 | 39.0 | 65.0 | 130 |
| 1.195 | 6.49 | 13.0 | 26.0 | 39.0 | 64.9 | 130 |
| 1.196 | 6.48 | 13.0 | 25.9 | 38.9 | 64.8 | 130 |
| 1.197 | 6.47 | 12.9 | 25.9 | 38.8 | 64.7 | 129 |
| 1.198 | 6.46 | 12.9 | 25.8 | 38.8 | 64.6 | 129 |
| 1.199 | 6.45 | 12.9 | 25.8 | 38.7 | 64.5 | 129 |
| 1.200 | 6.44 | 12.9 | 25.8 | 38.6 | 64.4 | 129 |
| 1.201 | 6.43 | 12.9 | 25.7 | 38.6 | 64.3 | 129 |
| 1.202 | 6.42 | 12.8 | 25.7 | 38.5 | 64.2 | 128 |
| 1.203 | 6.41 | 12.8 | 25.6 | 38.4 | 64.1 | 128 |
| 1.204 | 6.40 | 12.8 | 25.6 | 38.4 | 64.0 | 128 |
| 1.205 | 6.39 | 12.8 | 25.5 | 38.3 | 63.9 | 128 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.206 | 6.37 | 12.8 | 25.5 | 38.3 | 63.7 | 128 |
| 1.207 | 6.36 | 12.7 | 25.5 | 38.2 | 63.6 | 127 |
| 1.208 | 6.35 | 12.7 | 25.4 | 38.1 | 63.5 | 127 |
| 1.209 | 6.34 | 12.7 | 25.4 | 38.1 | 63.4 | 127 |
| 1.210 | 6.33 | 12.7 | 25.3 | 38.0 | 63.3 | 127 |
| 1.211 | 6.32 | 12.6 | 25.3 | 37.9 | 63.2 | 126 |
| 1.212 | 6.31 | 12.6 | 25.2 | 37.9 | 63.1 | 126 |
| 1.213 | 6.30 | 12.6 | 25.2 | 37.8 | 63.0 | 126 |
| 1.214 | 6.29 | 12.6 | 25.2 | 37.7 | 62.9 | 126 |
| 1.215 | 6.28 | 12.6 | 25.1 | 37.7 | 62.8 | 126 |
| 1.216 | 6.27 | 12.5 | 25.1 | 37.6 | 62.7 | 125 |
| 1.217 | 6.26 | 12.5 | 25.0 | 37.6 | 62.6 | 125 |
| 1.218 | 6.25 | 12.5 | 25.0 | 37.5 | 62.5 | 125 |
| 1.219 | 6.24 | 12.5 | 25.0 | 37.4 | 62.4 | 125 |
| 1.220 | 6.23 | 12.5 | 24.9 | 37.4 | 62.3 | 125 |
| 1.221 | 6.22 | 12.4 | 24.9 | 37.3 | 62.2 | 124 |
| 1.222 | 6.21 | 12.4 | 24.8 | 37.3 | 62.1 | 124 |
| 1.223 | 6.20 | 12.4 | 24.8 | 37.2 | 62.0 | 124 |
| 1.224 | 6.19 | 12.4 | 24.8 | 37.1 | 61.9 | 124 |
| 1.225 | 6.18 | 12.4 | 24.7 | 37.1 | 61.8 | 124 |
| 1.226 | 6.17 | 12.3 | 24.7 | 37.0 | 61.7 | 123 |
| 1.227 | 6.16 | 12.3 | 24.6 | 37.0 | 61.6 | 123 |
| 1.228 | 6.15 | 12.3 | 24.6 | 36.9 | 61.5 | 123 |
| 1.229 | 6.14 | 12.3 | 24.6 | 36.8 | 61.4 | 123 |
| 1.230 | 6.13 | 12.3 | 24.5 | 36.8 | 61.3 | 123 |
| 1.231 | 6.12 | 12.2 | 24.5 | 36.7 | 61.2 | 122 |
| 1.232 | 6.11 | 12.2 | 24.4 | 36.7 | 61.1 | 122 |
| 1.233 | 6.10 | 12.2 | 24.4 | 36.6 | 61.0 | 122 |
| 1.234 | 6.09 | 12.2 | 24.4 | 36.5 | 60.9 | 122 |
| 1.235 | 6.08 | 12.2 | 24.3 | 36.5 | 60.8 | 122 |
| 1.236 | 6.07 | 12.1 | 24.3 | 36.4 | 60.7 | 121 |
| 1.237 | 6.06 | 12.1 | 24.2 | 36.4 | 60.6 | 121 |
| 1.238 | 6.05 | 12.1 | 24.2 | 36.3 | 60.5 | 121 |
| 1.239 | 6.04 | 12.1 | 24.2 | 36.2 | 60.4 | 121 |
| 1.240 | 6.03 | 12.1 | 24.1 | 36.2 | 60.3 | 121 |
| 1.241 | 6.02 | 12.0 | 24.1 | 36.1 | 60.2 | 120 |
| 1.242 | 6.01 | 12.0 | 24.0 | 36.1 | 60.1 | 120 |
| 1.243 | 6.00 | 12.0 | 24.0 | 36.0 | 60.0 | 120 |
| 1.244 | 5.99 | 12.0 | 24.0 | 35.9 | 59.9 | 120 |
| 1.245 | 5.98 | 12.0 | 23.9 | 35.9 | 59.8 | 120 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.246 | 5.97 | 11.9 | 23.9 | 35.8 | 59.7 | 119 |
| 1.247 | 5.96 | 11.9 | 23.8 | 35.8 | 59.6 | 119 |
| 1.248 | 5.95 | 11.9 | 23.8 | 35.7 | 59.5 | 119 |
| 1.249 | 5.94 | 11.9 | 23.8 | 35.7 | 59.4 | 119 |
| 1.250 | 5.93 | 11.9 | 23.7 | 35.6 | 59.3 | 119 |
| 1.251 | 5.92 | 11.8 | 23.7 | 35.5 | 59.2 | 118 |
| 1.252 | 5.91 | 11.8 | 23.7 | 35.5 | 59.1 | 118 |
| 1.253 | 5.91 | 11.8 | 23.6 | 35.4 | 59.1 | 118 |
| 1.254 | 5.90 | 11.8 | 23.6 | 35.4 | 59.0 | 118 |
| 1.255 | 5.89 | 11.8 | 23.5 | 35.3 | 58.9 | 118 |
| 1.256 | 5.88 | 11.8 | 23.5 | 35.3 | 58.8 | 118 |
| 1.257 | 5.87 | 11.7 | 23.5 | 35.2 | 58.7 | 117 |
| 1.258 | 5.86 | 11.7 | 23.4 | 35.2 | 58.6 | 117 |
| 1.259 | 5.85 | 11.7 | 23.4 | 35.1 | 58.5 | 117 |
| 1.260 | 5.84 | 11.7 | 23.4 | 35.0 | 58.4 | 117 |
| 1.261 | 5.83 | 11.7 | 23.3 | 35.0 | 58.3 | 117 |
| 1.262 | 5.82 | 11.6 | 23.3 | 34.9 | 58.2 | 116 |
| 1.263 | 5.81 | 11.6 | 23.2 | 34.9 | 58.1 | 116 |
| 1.264 | 5.80 | 11.6 | 23.2 | 34.8 | 58.0 | 116 |
| 1.265 | 5.79 | 11.6 | 23.2 | 34.8 | 57.9 | 116 |
| 1.266 | 5.78 | 11.6 | 23.1 | 34.7 | 57.8 | 116 |
| 1.267 | 5.78 | 11.6 | 23.1 | 34.7 | 57.8 | 116 |
| 1.268 | 5.77 | 11.5 | 23.1 | 34.6 | 57.7 | 115 |
| 1.269 | 5.76 | 11.5 | 23.0 | 34.5 | 57.6 | 115 |
| 1.270 | 5.75 | 11.5 | 23.0 | 34.5 | 57.5 | 115 |
| 1.271 | 5.74 | 11.5 | 23.0 | 34.4 | 57.4 | 115 |
| 1.272 | 5.73 | 11.5 | 22.9 | 34.4 | 57.3 | 115 |
| 1.273 | 5.72 | 11.4 | 22.9 | 34.3 | 57.2 | 114 |
| 1.274 | 5.71 | 11.4 | 22.8 | 34.3 | 57.1 | 114 |
| 1.275 | 5.70 | 11.4 | 22.8 | 34.2 | 57.0 | 114 |
| 1.276 | 5.69 | 11.4 | 22.8 | 34.2 | 56.9 | 114 |
| 1.277 | 5.69 | 11.4 | 22.7 | 34.1 | 56.9 | 114 |
| 1.278 | 5.68 | 11.4 | 22.7 | 34.1 | 56.8 | 114 |
| 1.279 | 5.67 | 11.3 | 22.7 | 34.0 | 56.7 | 113 |
| 1.280 | 5.66 | 11.3 | 22.6 | 34.0 | 56.6 | 113 |
| 1.281 | 5.65 | 11.3 | 22.6 | 33.9 | 56.5 | 113 |
| 1.282 | 5.64 | 11.3 | 22.6 | 33.8 | 56.4 | 113 |
| 1.283 | 5.63 | 11.3 | 22.5 | 33.8 | 56.3 | 113 |
| 1.284 | 5.62 | 11.2 | 22.5 | 33.7 | 56.2 | 112 |
| 1.285 | 5.61 | 11.2 | 22.5 | 33.7 | 56.1 | 112 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.286 | 5.61 | 11.2 | 22.4 | 33.6 | 56.1 | 112 |
| 1 287 | 5.60 | 11.2 | 22.4 | 33.6 | 56.0 | 112 |
| 1.288 | 5.59 | 11.2 | 22.4 | 33.5 | 55.9 | 112 |
| 1.289 | 5.58 | 11.2 | 22.3 | 33.5 | 55.8 | 112 |
| 1 290 | 5.57 | 11.1 | 22.3 | 33.4 | 55.7 | 111 |
| 1.291 | 5.56 | 11.1 | 22.2 | 33.4 | 55.6 | 111 |
| 1.292 | 5.55 | 11.1 | 22.2 | 33.3 | 55.5 | 111 |
| 1.293 | 5.55 | 11.1 | 22.2 | 33.3 | 55.5 | 111 |
| 1.294 | 5.54 | 11.1 | 22.1 | 33.2 | 55.4 | 111 |
| 1.295 | 5.53 | 11.1 | 22.1 | 33.2 | 55.3 | 111 |
| 1.296 | 5.52 | 11.0 | 22.1 | 33.1 | 55.2 | 110 |
| 1.297 | 5.51 | 11.0 | 22.0 | 33.1 | 55.1 | 110 |
| 1.298 | 5.50 | 11.0 | 22.0 | 33.0 | 55.0 | 110 |
| 1 299 | 5.49 | 11.0 | 22.0 | 33.0 | 54.9 | 110 |
| 1.300 | 5.49 | 11.0 | 21.9 | 32.9 | 54.9 | 110 |
| 1.301 | 5.48 | 11.0 | 21.9 | 32.9 | 54.8 | 110 |
| 1.302 | 5.47 | 10.9 | 21.9 | 32.8 | 54.7 | 109 |
| 1.303 | 5.46 | 10.9 | 21.8 | 32.8 | 54.6 | 109 |
| 1.304 | 5.45 | 10.9 | 21.8 | 32.7 | 54.5 | 109 |
| 1.305 | 5.44 | 10.9 | 21.8 | 32.7 | 54.4 | 109 |
| 1.306 | 5.44 | 10.9 | 21.7 | 32.6 | 54.4 | 109 |
| 1.307 | 5.43 | 10.9 | 21.7 | 32.6 | 54.3 | 109 |
| 1.308 | 5.42 | 10.8 | 21.7 | 32.5 | 54.2 | 108 |
| 1.309 | 5.41 | 10.8 | 21.6 | 32.5 | 54.1 | 108 |
| 1.310 | 5.40 | 10.8 | 21.6 | 32.4 | 54.0 | 108 |
| 1.311 | 5.39 | 10.8 | 21.6 | 32.4 | 53.9 | 108 |
| 1.312 | 5.39 | 10.8 | 21.5 | 32.3 | 53.9 | 108 |
| 1.313 | 5.38 | 10.8 | 21.5 | 32.3 | 53.8 | 108 |
| 1.314 | 5.37 | 10.7 | 21.5 | 32.2 | 53.7 | 107 |
| 1.315 | 5.36 | 10.7 | 21.4 | 32.2 | 53.6 | 107 |
| 1.316 | 5.35 | 10.7 | 21.4 | 32.1 | 53.5 | 107 |
| 1.317 | 5.35 | 10.7 | 21.4 | 32.1 | 53.5 | 107 |
| 1.318 | 5.34 | 10.7 | 21.3 | 32.0 | 53.4 | 107 |
| 1.319 | 5.33 | 10.7 | 21.3 | 32.0 | 53.3 | 107 |
| 1.320 | 5.32 | 10.6 | 21.3 | 31.9 | 53.2 | 106 |
| 1.321 | 5.31 | 10.6 | 21.3 | 31.9 | 53.1 | 106 |
| 1.322 | 5.31 | 10.6 | 21.2 | 31.8 | 53.1 | 106 |
| 1.323 | 5.30 | 10.6 | 21.2 | 31.8 | 53.0 | 106 |
| 1.324 | 5.29 | 10.6 | 21.2 | 31.7 | 52.9 | 106 |
| 1.325 | 5.28 | 10.6 | 21.1 | 31.7 | 52.8 | 106 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.326 | 5.27 | 10.5 | 21.1 | 31.6 | 52.7 | 105 |
| 1.321 | 5.27 | 10.5 | 21.1 | 31.6 | 52.7 | 105 |
| 1.328 | 5.26 | 10.5 | 21.0 | 31.5 | 52.6 | 105 |
| 1.329 | 5.25 | 10.5 | 21.0 | 31.5 | 52.5 | 105 |
| 1.330 | 5.24 | 10.5 | 21.0 | 31.5 | 52.4 | 105 |
| 1.331 | 5.23 | 10.5 | 20.9 | 31.4 | 52.3 | 105 |
| 1.332 | 5.23 | 10.5 | 20.9 | 31.4 | 52.3 | 105 |
| 1.333 | 5.22 | 10.4 | 20.9 | 31.3 | 52.2 | 104 |
| 1.334 | 5.21 | 10.4 | 20.8 | 31.3 | 52.1 | 104 |
| 1.335 | 5.20 | 10.4 | 20.8 | 31.2 | 52.0 | 104 |
| 1.336 | 5.19 | 10.4 | 20.8 | 31.2 | 51.9 | 104 |
| 1.337 | 5.19 | 10.4 | 20.7 | 31.1 | 51.9 | 104 |
| 1.338 | 5.18 | 10.4 | 20.7 | 31.1 | 51.8 | 104 |
| 1.339 | 5.17 | 10.3 | 20.7 | 31.0 | 51.7 | 103 |
| 1.340 | 5.16 | 10.3 | 20.7 | 31.0 | 51.6 | 103 |
| 1.341 | 5.16 | 10.3 | 20.6 | 30.9 | 51.6 | 103 |
| 1.342 | 5.15 | 10.3 | 20.6 | 30.9 | 51.5 | 103 |
| 1.343 | 5.14 | 10.3 | 20.6 | 30.8 | 51.4 | 103 |
| 1.344 | 5.13 | 10.3 | 20.5 | 30.8 | 51.3 | 103 |
| 1.345 | 5.13 | 10.3 | 20.5 | 30.8 | 51.3 | 103 |
| 1.346 | 5.12 | 10.2 | 20.5 | 30.7 | 51.2 | 102 |
| 1.347 | 5.11 | 10.2 | 20.4 | 30.7 | 51.1 | 102 |
| 1.348 | 5.10 | 10.2 | 20.4 | 30.6 | 51.0 | 102 |
| 1.349 | 5.09 | 10.2 | 20.4 | 30.6 | 50.9 | 102 |
| 1.350 | 5.09 | 10.2 | 20.3 | 30.5 | 50.9 | 102 |
| 1.351 | 5.08 | 10.2 | 20.3 | 30.5 | 50.8 | 102 |
| 1.352 | 5.07 | 10.1 | 20.3 | 30.4 | 50.7 | 101 |
| 1.353 | 5.06 | 10.1 | 20.3 | 30.4 | 50.6 | 101 |
| 1.354 | 5.06 | 10.1 | 20.2 | 30.3 | 50.6 | 101 |
| 1.355 | 5.05 | 10.1 | 20.2 | 30.3 | 50.5 | 101 |
| 1.356 | 5.04 | 10.1 | 20.2 | 30.3 | 50.4 | 101 |
| 1.357 | 5.03 | 10.1 | 20.1 | 30.2 | 50.3 | 101 |
| 1.358 | 5.03 | 10.1 | 20.1 | 30.2 | 50.3 | 101 |
| 1.359 | 5.02 | 10.0 | 20.1 | 30.1 | 50.2 | 100 |
| 1.360 | 5.01 | 10.0 | 20.0 | 30.1 | 50.1 | 100 |
| 1.361 | 5.01 | 10.0 | 20.0 | 30.0 | 50.1 | 100 |
| 1.362 | 5.00 | 10.0 | 20.0 | 30.0 | 50.0 | 100 |
| 1.363 | 4.99 | 9.98 | 20.0 | 29.9 | 49.9 | 99.8 |
| 1.364 | 4.98 | 9.97 | 19.9 | 29.9 | 49.8 | 99.7 |
| 1.365 | 4.98 | 9.95 | 19.9 | 29.9 | 49.8 | 99.5 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.366 | 4.97 | 9.94 | 19.9 | 29.8 | 49.7 | 99.4 |
| 1.367 | 4.96 | 9.92 | 19.8 | 29.8 | 49.6 | 99.2 |
| 1.368 | 4.95 | 9.91 | 19.8 | 29.7 | 49.5 | 99.1 |
| 1.369 | 4.95 | 9.90 | 19.8 | 29.7 | 49.5 | 99.0 |
| 1.370 | — | 9.88 | 19.8 | 29.6 | 49.4 | 98.8 |
| 1.371 | — | 9.87 | 19.7 | 29.6 | 49.3 | 98.7 |
| 1.372 | — | 9.85 | 19.7 | 29.6 | 49.3 | 98.5 |
| 1.373 | — | 9.84 | 19.7 | 29.5 | 49.2 | 98.4 |
| 1.374 | — | 9.82 | 19.6 | 29.5 | 49.1 | 98.2 |
| 1.375 | — | 9.81 | 19.6 | 29.4 | 49.0 | 98.1 |
| 1.376 | — | 9.79 | 19.6 | 29.4 | 49.0 | 97.9 |
| 1.377 | — | 9.78 | 19.6 | 29.3 | 48.9 | 97.8 |
| 1.378 | — | 9.77 | 19.5 | 29.3 | 48.8 | 97.7 |
| 1.379 | — | 9.75 | 19.5 | 29.3 | 48.8 | 97.5 |
| 1.380 | — | 9.74 | 19.5 | 29.2 | 48.7 | 97.4 |
| 1.381 | — | 9.72 | 19.4 | 29.2 | 48.6 | 97.2 |
| 1.382 | — | 9.71 | 19.4 | 29.1 | 48.5 | 97.1 |
| 1.383 | — | 9.70 | 19.4 | 29.1 | 48.5 | 97.0 |
| 1.384 | — | 9.68 | 19.4 | 29.0 | 48.4 | 96.8 |
| 1.385 | — | 9.67 | 19.3 | 29.0 | 48.3 | 96.7 |
| 1.386 | — | 9.65 | 19.3 | 29.0 | 48.3 | 96.5 |
| 1.387 | — | 9.64 | 19.3 | 28.9 | 48.2 | 96.4 |
| 1.388 | — | 9.63 | 19.2 | 28.9 | 48.1 | 96.3 |
| 1.389 | — | 9.61 | 19.2 | 28.8 | 48.1 | 96.1 |
| 1.390 | — | 9.60 | 19.2 | 28.8 | 48.0 | 96.0 |
| 1.391 | — | 9.58 | 19.2 | 28.8 | 47.9 | 95.8 |
| 1.392 | — | 9.57 | 19.1 | 28.7 | 47.8 | 95.7 |
| 1.393 | — | 9.56 | 19.1 | 28.7 | 47.8 | 95.6 |
| 1.394 | — | 9.54 | 19.1 | 28.6 | 47.7 | 95.4 |
| 1.395 | — | 9.53 | 19.1 | 28.6 | 47.6 | 95.3 |
| 1.396 | — | 9.52 | 19.0 | 28.5 | 47.6 | 95.2 |
| 1.397 | — | 9.50 | 19.0 | 28.5 | 47.5 | 95.0 |
| 1.398 | — | 9.49 | 19.0 | 25.5 | 47.4 | 94.9 |
| 1.399 | — | 9.48 | 18.9 | 28.4 | 47.4 | 94.8 |
| 1.400 | — | 9.46 | 18.9 | 28.4 | 47.3 | 94.6 |
| 1.401 | — | 9.45 | 18.9 | 28.3 | 47.2 | 94.5 |
| 1.402 | — | 9.43 | 18.9 | 28.3 | 47.2 | 94.3 |
| 1.403 | — | 9.42 | 18.8 | 28.3 | 47.1 | 94.2 |
| 1.404 | — | 9.41 | 18.8 | 28.2 | 47.0 | 94.1 |
| 1.405 | — | 9.39 | 18.8 | 28.2 | 47.0 | 93.9 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.406 | — | 9.38 | 18.8 | 28.1 | 46.9 | 93.8 |
| 1.407 | — | 9.37 | 18.7 | 28.1 | 46.8 | 93.7 |
| 1.408 | — | 9.35 | 18.7 | 28.1 | 46.8 | 93.5 |
| 1.409 | — | 9.34 | 18.7 | 28.0 | 46.7 | 93.4 |
| 1.410 | — | 9.33 | 18.7 | 28.0 | 46.6 | 93.3 |
| 1.411 | — | 9.31 | 18.6 | 27.9 | 46.6 | 93.1 |
| 1.412 | — | 9.30 | 18.6 | 27.9 | 46.5 | 93.0 |
| 1.413 | — | 9.29 | 18.6 | 27.9 | 46.4 | 92.9 |
| 1.414 | — | 9.28 | 18.5 | 27.8 | 46.4 | 92.8 |
| 1.415 | — | 9.26 | 18.5 | 27.8 | 46.3 | 92.6 |
| 1.416 | — | 9.25 | 18.5 | 27.7 | 46.2 | 92.5 |
| 1.417 | — | 9.24 | 18.5 | 27.7 | 46.2 | 92.4 |
| 1.418 | — | 9.22 | 18.4 | 27.7 | 46.1 | 92.2 |
| 1.419 | — | 9.21 | 18.4 | 27.6 | 46.0 | 92.1 |
| 1.420 | — | 9.20 | 18.4 | 27.6 | 46.0 | 92.0 |
| 1.421 | — | 9.18 | 18.4 | 27.6 | 45.9 | 91.8 |
| 1.422 | — | 9.17 | 18.3 | 27.5 | 45.9 | 91.7 |
| 1.423 | — | 9.16 | 18.3 | 27.5 | 45.8 | 91.6 |
| 1.424 | — | 9.15 | 18.3 | 27.4 | 45.7 | 91.5 |
| 1.425 | — | 9.13 | 18.3 | 27.4 | 45.7 | 91.3 |
| 1.426 | — | 9.12 | 18.2 | 27.4 | 45.6 | 91.2 |
| 1.427 | — | 9.11 | 18.2 | 27.3 | 45.5 | 91.1 |
| 1.428 | — | 9.09 | 18.2 | 27.3 | 45.5 | 90.9 |
| 1.429 | — | 9.08 | 18.2 | 27.2 | 45.4 | 90.8 |
| 1.430 | — | 9.07 | 18.1 | 27.2 | 45.3 | 90.7 |
| 1.431 | — | 9.06 | 18.1 | 27.2 | 45.3 | 90.6 |
| 1.432 | — | 9.04 | 18.1 | 27.1 | 45.2 | 90.4 |
| 1.433 | — | 9.03 | 18.1 | 27.1 | 45.2 | 90.3 |
| 1.434 | — | 9.02 | 18.0 | 27.1 | 45.1 | 90.2 |
| 1.435 | — | 9.01 | 18.0 | 27.0 | 45.0 | 90.1 |
| 1.436 | — | 8.99 | 18.0 | 27.0 | 45.0 | 89.9 |
| 1.437 | — | 8.98 | 18.0 | 26.9 | 44.9 | 89.8 |
| 1.438 | — | 8.97 | 17.9 | 26.9 | 44.8 | 89.7 |
| 1.439 | — | 8.96 | 17.9 | 26.9 | 44.8 | 89.6 |
| 1.440 | — | 8.94 | 17.9 | 26.8 | 44.7 | 89.4 |
| 1.441 | — | 8.93 | 17.9 | 26.8 | 44.7 | 89.3 |
| 1.442 | — | 8.92 | 17.8 | 26.8 | 44.6 | 89.2 |
| 1.443 | — | 8.91 | 17.8 | 26.7 | 44.5 | 89.1 |
| 1.444 | — | 8.89 | 17.8 | 26.7 | 44.5 | 88.9 |
| 1.445 | — | 8.88 | 17.8 | 26.6 | 44.4 | 88.8 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.446 | — | 8.87 | 17.7 | 26.6 | 44.3 | 88.7 |
| 1.447 | — | 8.86 | 17.7 | 26.6 | 44.3 | 88.6 |
| 1.448 | — | 8.84 | 17.7 | 26.5 | 44.2 | 88.4 |
| 1.449 | — | 8.83 | 17.7 | 26.5 | 44.2 | 88.3 |
| 1.450 | — | 8.82 | 17.6 | 26.5 | 44.1 | 88.2 |
| 1.451 | — | 8.81 | 17.6 | 26.4 | 44.0 | 88.1 |
| 1.452 | — | 8.80 | 17.6 | 26.4 | 44.0 | 88.0 |
| 1.453 | — | 8.78 | 17.6 | 26.4 | 43.9 | 87.8 |
| 1.454 | — | 8.77 | 17.5 | 26.3 | 43.9 | 87.7 |
| 1.455 | — | 8.76 | 17.5 | 26.3 | 43.8 | 87.6 |
| 1.456 | — | 8.75 | 17.5 | 26.2 | 43.7 | 87.5 |
| 1.457 | — | 8.74 | 17.5 | 26.2 | 43.7 | 87.4 |
| 1.458 | — | 8.72 | 17.4 | 26.2 | 43.6 | 87.2 |
| 1.459 | — | 8.71 | 17.4 | 26.1 | 43.6 | 87.1 |
| 1.460 | — | 8.70 | 17.4 | 26.1 | 43.5 | 87.0 |
| 1.461 | — | 8.69 | 17.4 | 26.1 | 43.4 | 86.9 |
| 1.462 | — | 8.68 | 17.3 | 26.0 | 43.4 | 86.8 |
| 1.463 | — | 8.66 | 17.3 | 26.0 | 43.3 | 86.6 |
| 1.464 | — | 8.65 | 17.3 | 26.0 | 43.3 | 86.5 |
| 1.465 | — | 8.64 | 17.3 | 25.9 | 43.2 | 86.4 |
| 1.466 | — | 8.63 | 17.3 | 25.9 | 43.1 | 86.3 |
| 1.467 | — | 8.62 | 17.2 | 25.9 | 43.1 | 86.2 |
| 1.468 | — | 8.61 | 17.2 | 25.8 | 43.0 | 86.1 |
| 1.469 | — | 8.59 | 17.2 | 25.8 | 43.0 | 85.9 |
| 1.470 | — | 8.58 | 17.2 | 25.7 | 42.9 | 85.8 |
| 1.471 | — | 8.57 | 17.1 | 25.7 | 42.8 | 85.7 |
| 1.472 | — | 8.56 | 17.1 | 25.7 | 42.8 | 85.6 |
| 1.473 | — | 8.55 | 17.1 | 25.6 | 42.7 | 85.5 |
| 1.474 | — | 8.54 | 17.1 | 25.6 | 42.7 | 85.4 |
| 1.475 | — | 8.52 | 17.0 | 25.6 | 42.6 | 85.2 |
| 1.476 | — | 8.51 | 17.0 | 25.5 | 42.6 | 85.1 |
| 1.477 | — | 8.50 | 17.0 | 25.5 | 42.5 | 85.0 |
| 1.478 | — | 8.49 | 17.0 | 25.5 | 42.4 | 84.9 |
| 1.479 | — | 8.48 | 17.0 | 25.4 | 42.4 | 84.8 |
| 1.480 | — | 8.47 | 16.9 | 25.4 | 42.3 | 84.7 |
| 1.481 | — | 8.46 | 16.9 | 25.4 | 42.3 | 84.6 |
| 1.482 | — | 8.44 | 16.9 | 25.3 | 42.2 | 84.4 |
| 1.483 | — | 8.43 | 16.9 | 25.3 | 42.2 | 84.3 |
| 1.484 | — | 8.42 | 16.8 | 25.3 | 42.1 | 84.2 |
| 1.485 | — | 8.41 | 16.8 | 25.2 | 42.0 | 84.1 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.486 | — | 8.40 | 16.8 | 25.2 | 42.0 | 84.0 |
| 1.487 | — | 8.39 | 16.8 | 25.2 | 41.9 | 83.9 |
| 1.488 | — | 8.38 | 16.7 | 25.1 | 41.9 | 83.8 |
| 1.489 | — | 8.36 | 16.7 | 25.1 | 41.8 | 83.6 |
| 1.490 | — | 8.35 | 16.7 | 25.1 | 41.8 | 83.5 |
| 1.491 | — | 8.34 | 16.7 | 25.0 | 41.7 | 83.4 |
| 1.492 | — | 8.33 | 16.7 | 25.0 | 41.7 | 83.3 |
| 1.493 | — | 8.32 | 16.6 | 25.0 | 41.6 | 83.2 |
| 1.494 | — | 8.31 | 16.6 | 24.9 | 41.5 | 83.1 |
| 1.495 | — | 8.30 | 16.6 | 24.9 | 41.5 | 83.0 |
| 1.496 | — | 8.29 | 16.6 | 24.9 | 41.4 | 82.9 |
| 1.497 | — | 8.28 | 16.5 | 24.8 | 41.4 | 82.8 |
| 1.498 | — | 8.26 | 16.5 | 24.8 | 41.3 | 82.6 |
| 1.499 | — | 8.25 | 16.5 | 24.8 | 41.3 | 87.5 |
| 1.500 | — | 8.24 | 16.5 | 24.7 | 41.2 | 82.4 |
| 1.501 | — | 8.23 | 16.5 | 24.7 | 41.2 | 82.3 |
| 1.502 | — | 8.22 | 16.4 | 24.7 | 41.1 | 82.2 |
| 1.503 | — | 8.21 | 16.4 | 24.6 | 41.0 | 82.1 |
| 1.504 | — | 8.20 | 16.4 | 24.6 | 41.0 | 82.0 |
| 1.505 | — | 8.19 | 16.4 | 24.6 | 40.9 | 81.9 |
| 1.506 | — | 8.18 | 16.4 | 24.5 | 40.9 | 81.8 |
| 1.507 | — | 8.17 | 16.3 | 24.5 | 40.8 | 81.7 |
| 1.508 | — | 8.16 | 16.3 | 24.5 | 40.8 | 81.6 |
| 1.509 | — | 8.14 | 16.3 | 24.4 | 40.7 | 81.4 |
| 1.510 | — | 8.13 | 16.3 | 24.4 | 40.7 | 81.3 |
| 1.511 | — | 8.12 | 16.2 | 24.4 | 40.6 | 81.2 |
| 1.512 | — | 8.11 | 16.2 | 24.3 | 40.6 | 81.1 |
| 1.513 | — | 8.10 | 16.2 | 24.3 | 40.5 | 81.0 |
| 1.514 | — | 8.09 | 16.2 | 24.3 | 40.4 | 80.9 |
| 1.515 | — | 8.08 | 16.2 | 24.2 | 40.4 | 80.8 |
| 1.516 | — | 8.07 | 16.1 | 24.2 | 40.3 | 80.7 |
| 1.517 | — | 8.06 | 16.1 | 24.2 | 40.3 | 80.6 |
| 1.518 | — | 8.05 | 16.1 | 24.1 | 40.2 | 80.5 |
| 1.519 | — | 8.04 | 16.1 | 24.1 | 40.2 | 80.4 |
| 1.520 | — | 8.03 | 16.1 | 24.1 | 40.1 | 80.3 |
| 1.521 | — | 8.02 | 16.0 | 24.0 | 40.1 | 80.2 |
| 1.522 | — | 8.01 | 16.0 | 24.0 | 40.0 | 80.1 |
| 1.523 | — | 8.00 | 16.0 | 24.0 | 40.0 | 80.0 |
| 1.524 | — | 7.98 | 16.0 | 24.0 | 39.9 | 79.8 |
| 1.525 | — | 7.97 | 15.9 | 23.9 | 39.9 | 79.7 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.526 | — | 7.96 | 15.9 | 23.9 | 39.8 | 79.6 |
| 1.527 | — | 7.95 | 15.9 | 23.9 | 39.8 | 79.5 |
| 1.528 | — | 7.94 | 15.9 | 23.8 | 39.7 | 79.4 |
| 1.529 | — | 7.93 | 15.9 | 23.8 | 39.7 | 79.3 |
| 1.530 | — | 7.92 | 15.8 | 23.8 | 39.6 | 79.2 |
| 1.531 | — | 7.91 | 15.8 | 23.7 | 39.6 | 79.1 |
| 1.532 | — | 7.90 | 15.8 | 23.7 | 39.5 | 79.0 |
| 1.533 | — | 7.89 | 15.8 | 23.7 | 39.5 | 78.9 |
| 1.534 | — | 7.88 | 15.8 | 23.6 | 39.4 | 78.8 |
| 1.535 | — | 7.87 | 15.7 | 23.6 | 39.3 | 78.7 |
| 1.536 | — | 7.86 | 15.7 | 23.6 | 39.3 | 78.6 |
| 1.537 | — | 7.85 | 15.7 | 23.5 | 39.2 | 78.5 |
| 1.538 | — | 7.84 | 15.7 | 23.5 | 39.2 | 78.4 |
| 1.539 | — | 7.83 | 15.7 | 23.5 | 39.1 | 78.3 |
| 1.540 | — | 7.82 | 15.6 | 23.5 | 39.1 | 78.2 |
| 1.541 | — | 7.81 | 15.6 | 23.4 | 39.0 | 78.1 |
| 1.542 | — | 7.80 | 15.6 | 23.4 | 39.0 | 78.0 |
| 1.543 | — | 7.79 | 15.6 | 23.4 | 38.9 | 77.9 |
| 1.544 | — | 7.78 | 15.6 | 23.3 | 38.9 | 77.8 |
| 1.545 | — | 7.77 | 15.5 | 23.3 | 38.8 | 77.7 |
| 1.546 | — | 7.76 | 15.5 | 23.3 | 38.8 | 77.6 |
| 1.547 | — | 7.75 | 15.5 | 23.2 | 38.7 | 77.5 |
| 1.548 | — | 7.74 | 15.5 | 23.2 | 38.7 | 77.4 |
| 1.549 | — | 7.73 | 15.5 | 23.2 | 38.6 | 77.3 |
| 1.550 | — | 7.72 | 15.4 | 23.2 | 38.6 | 77.2 |
| 1.551 | — | 7.71 | 15.4 | 23.1 | 38.5 | 77.1 |
| 1.552 | — | 7.70 | 15.4 | 23.1 | 38.5 | 77.0 |
| 1.553 | — | 7.69 | 15.4 | 23.1 | 38.4 | 76.9 |
| 1.554 | — | 7.68 | 15.4 | 23.0 | 38.4 | 76.8 |
| 1.555 | — | 7.67 | 15.3 | 23.0 | 38.3 | 76.7 |
| 1.556 | — | 7.66 | 15.3 | 23.0 | 38.3 | 76.6 |
| 1.557 | — | 7.65 | 15.3 | 22.9 | 38.2 | 76.5 |
| 1.558 | — | 7.64 | 15.3 | 22.9 | 38.2 | 76.4 |
| 1.559 | — | 7.63 | 15.3 | 22.9 | 38.1 | 76.3 |
| 1.560 | — | 7.62 | 15.2 | 22.9 | 38.1 | 76.2 |
| 1.561 | — | 7.61 | 15.2 | 22.8 | 38.0 | 76.1 |
| 1.562 | — | 7.60 | 15.2 | 22.8 | 38.0 | 76.0 |
| 1.563 | — | 7.59 | 15.2 | 22.8 | 38.0 | 75.9 |
| 1.564 | — | 7.58 | 15.2 | 22.7 | 37.9 | 75.8 |
| 1.565 | — | 7.57 | 15.1 | 22.7 | 37.9 | 75.7 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.566 | — | 7.56 | 15.1 | 22.7 | 37.8 | 75.6 |
| 1.567 | — | 7.55 | 15.1 | 22.7 | 37.8 | 75.5 |
| 1.568 | — | 7.54 | 15.1 | 22.6 | 37.7 | 75.4 |
| 1.569 | — | 7.53 | 15.1 | 22.6 | 37.7 | 75.3 |
| 1.570 | — | 7.52 | 15.0 | 22.6 | 37.6 | 75.2 |
| 1.571 | — | 7.51 | 15.0 | 22.5 | 37.6 | 75.1 |
| 1.572 | — | 7.50 | 15.0 | 22.5 | 37.5 | 75.0 |
| 1.573 | — | 7.49 | 15.0 | 22.5 | 37.5 | 74.9 |
| 1.574 | — | 7.49 | 15.0 | 22.5 | 37.4 | 74.9 |
| 1.575 | — | 7.48 | 14.9 | 22.4 | 37.4 | 74.8 |
| 1.576 | — | 7.47 | 14.9 | 22.4 | 37.3 | 74.7 |
| 1.577 | — | 7.46 | 14.9 | 22.4 | 37.3 | 74.6 |
| 1.578 | — | 7.45 | 14.9 | 22.3 | 37.2 | 74.5 |
| 1.579 | — | 7.44 | 14.9 | 22.3 | 37.2 | 74.4 |
| 1.580 | — | 7.43 | 14.9 | 22.3 | 37.1 | 74.3 |
| 1.581 | — | 7.42 | 14.8 | 22.3 | 37.1 | 74.2 |
| 1.582 | — | 7.41 | 14.8 | 22.2 | 37.0 | 74.1 |
| 1.583 | — | 7.40 | 14.8 | 22.2 | 37.0 | 74.0 |
| 1.584 | — | 7.39 | 14.8 | 22.2 | 37.0 | 73.9 |
| 1.585 | — | 7.38 | 14.8 | 22.1 | 36.9 | 73.8 |
| 1.586 | — | 7.37 | 14.7 | 22.1 | 36.9 | 73.7 |
| 1.587 | — | 7.36 | 14.7 | 22.1 | 36.8 | 73.6 |
| 1.588 | — | 7.35 | 14.7 | 22.1 | 36.8 | 73.5 |
| 1.589 | — | 7.34 | 14.7 | 22.0 | 36.7 | 73.4 |
| 1.590 | — | 7.34 | 14.7 | 22.0 | 36.7 | 73.4 |
| 1.591 | — | 7.33 | 14.6 | 22.0 | 36.6 | 73.3 |
| 1.592 | — | 7.32 | 14.6 | 22.0 | 36.6 | 73.2 |
| 1.593 | — | 7.31 | 14.6 | 21.9 | 36.5 | 73.1 |
| 1.594 | — | 7.30 | 14.6 | 21.9 | 36.5 | 73.0 |
| 1.595 | — | 7.29 | 14.6 | 21.9 | 36.4 | 72.9 |
| 1.596 | — | 7.28 | 14.6 | 21.8 | 36.4 | 72.8 |
| 1.597 | — | 7.27 | 14.5 | 21.8 | 36.4 | 72.7 |
| 1.598 | — | 7.26 | 14.5 | 21.8 | 36.3 | 72.6 |
| 1.599 | — | 7.25 | 14.5 | 21.8 | 36.3 | 72.5 |
| 1.600 | — | 7.24 | 14.5 | 21.7 | 36.2 | 72.4 |
| 1.601 | — | 7.24 | 14.5 | 21.7 | 36.2 | 72.4 |
| 1.602 | — | 7.23 | 14.4 | 21.7 | 36.1 | 72.3 |
| 1.603 | — | 7.22 | 14.4 | 21.7 | 36.1 | 72.2 |
| 1.604 | — | 7.21 | 14.4 | 21.6 | 36.0 | 72.1 |
| 1.605 | — | 7.20 | 14.4 | 21.6 | 36.0 | 72.0 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.606 | — | 7.19 | 14.4 | 21.6 | 35.9 | 71.9 |
| 1.607 | — | 7.18 | 14.4 | 21.5 | 35.9 | 71.8 |
| 1.608 | — | 7.17 | 14.3 | 21.5 | 35.9 | 71.7 |
| 1.609 | — | 7.16 | 14.3 | 21.5 | 35.8 | 71.6 |
| 1.610 | — | 7.15 | 14.3 | 21.5 | 35.8 | 71.5 |
| 1.611 | — | 7.15 | 14.3 | 21.4 | 35.7 | 71.5 |
| 1.612 | — | 7.14 | 14.3 | 21.4 | 35.7 | 71.4 |
| 1.613 | — | 7.13 | 14.3 | 21.4 | 35.6 | 71.3 |
| 1.614 | — | 7.12 | 14.2 | 21.4 | 35.6 | 71.2 |
| 1.615 | — | 7.11 | 14.2 | 21.3 | 35.5 | 71.1 |
| 1.616 | — | 7.10 | 14.2 | 21.3 | 35.5 | 71.0 |
| 1.617 | — | 7.09 | 14.2 | 21.3 | 35.5 | 70.9 |
| 1.618 | — | 7.08 | 14.2 | 21.3 | 35.4 | 70.8 |
| 1.619 | — | 7.08 | 14.1 | 21.2 | 35.4 | 70.8 |
| 1.620 | — | 7.07 | 14.1 | 21.2 | 35.3 | 70.7 |
| 1.621 | — | 7.06 | 14.1 | 21.2 | 35.3 | 70.6 |
| 1.622 | — | 7.05 | 14.1 | 21.1 | 35.2 | 70.5 |
| 1.623 | — | 7.04 | 14.1 | 21.1 | 35.2 | 70.4 |
| 1.624 | — | 7.03 | 14.1 | 21.1 | 35.2 | 70.3 |
| 1.625 | — | 7.02 | 14.0 | 21.1 | 35.1 | 70.2 |
| 1.626 | — | 7.01 | 14.0 | 21.0 | 35.1 | 70.1 |
| 1.627 | — | 7.01 | 14.0 | 21.0 | 35.0 | 70.1 |
| 1.628 | — | 7.00 | 14.0 | 21.0 | 35.0 | 70.0 |
| 1.629 | — | 6.99 | 14.0 | 21.0 | 34.9 | 69.9 |
| 1.630 | — | 6.98 | 14.0 | 20.9 | 34.9 | 69.8 |
| 1.631 | — | 6.97 | 13.9 | 20.9 | 34.9 | 69.7 |
| 1.632 | — | 6.96 | 13.9 | 20.9 | 34.8 | 69.6 |
| 1.633 | — | 6.95 | 13.9 | 20.9 | 34.8 | 69.5 |
| 1.634 | — | 6.95 | 13.9 | 20.8 | 34.7 | 69.5 |
| 1.635 | — | 6.94 | 13.9 | 20.8 | 34.7 | 69.4 |
| 1.636 | — | 6.93 | 13.9 | 20.8 | 34.6 | 69.3 |
| 1.637 | — | 6.92 | 13.8 | 20.8 | 34.6 | 69.2 |
| 1.638 | — | 6.91 | 13.8 | 20.7 | 34.6 | 69.1 |
| 1.639 | — | 6.90 | 13.8 | 20.7 | 34.5 | 69.0 |
| 1.640 | — | 6.90 | 13.8 | 20.7 | 34.5 | 69.0 |
| 1.641 | — | 6.89 | 13.8 | 20.7 | 34.4 | 68.9 |
| 1.642 | — | 6.88 | 13.8 | 20.6 | 34.4 | 68.8 |
| 1.643 | — | 6.87 | 13.7 | 20.6 | 34.3 | 68.7 |
| 1.644 | — | 6.86 | 13.7 | 20.6 | 34.3 | 68.6 |
| 1.645 | — | 6.85 | 13.7 | 20.6 | 34.3 | 68.5 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.646 | — | 6.84 | 13.7 | 20.5 | 34.2 | 68.4 |
| 1.647 | — | 6.84 | 13.7 | 20.5 | 34.2 | 68.4 |
| 1.648 | — | 6.83 | 13.7 | 20.5 | 34.1 | 68.3 |
| 1.649 | — | 6.82 | 13.6 | 20.5 | 34.1 | 68.2 |
| 1.650 | — | 6.81 | 13.6 | 20.4 | 34.1 | 68.1 |
| 1.651 | — | 6.80 | 13.6 | 20.4 | 34.0 | 68.0 |
| 1.652 | — | 6.80 | 13.6 | 20.4 | 34.0 | 68.0 |
| 1.653 | — | 6.79 | 13.6 | 20.4 | 33.9 | 67.9 |
| 1.654 | — | 6.78 | 13.6 | 20.3 | 33.9 | 67.8 |
| 1.655 | — | 6.77 | 13.5 | 20.3 | 33.8 | 67.7 |
| 1.656 | — | 6.76 | 13.5 | 20.3 | 33.8 | 67.6 |
| 1.657 | — | 6.75 | 13.5 | 20.3 | 33.8 | 67.5 |
| 1.658 | — | 6.75 | 13.5 | 20.2 | 33.7 | 67.5 |
| 1.659 | — | 6.74 | 13.5 | 20.2 | 33.7 | 67.4 |
| 1.660 | — | 6.73 | 13.5 | 20.2 | 33.6 | 67.3 |
| 1.661 | — | 6.72 | 13.4 | 20.2 | 33.6 | 67.2 |
| 1.662 | — | 6.71 | 13.4 | 20.1 | 33.6 | 67.1 |
| 1.663 | — | 6.71 | 13.4 | 20.1 | 33.5 | 67.1 |
| 1.664 | — | 6.70 | 13.4 | 20.1 | 33.5 | 67.0 |
| 1.665 | — | 6.69 | 13.4 | 20.1 | 33.4 | 66.9 |
| 1.666 | — | 6.68 | 13.4 | 20.0 | 33.4 | 66.8 |
| 1.667 | — | 6.67 | 13.3 | 20.0 | 33.4 | 66.7 |
| 1.668 | — | 6.67 | 13.3 | 20.0 | 33.3 | 66.7 |
| 1.669 | — | 6.66 | 13.3 | 20.0 | 33.3 | 66.6 |
| 1.670 | — | 6.65 | 13.3 | 19.9 | 33.2 | 66.5 |
| 1.671 | — | 6.64 | 13.3 | 19.9 | 33.2 | 66.4 |
| 1.672 | — | 6.63 | 13.3 | 19.9 | 33.2 | 66.3 |
| 1.673 | — | 6.63 | 13.2 | 19.9 | 33.1 | 66.3 |
| 1.674 | — | 6.62 | 13.2 | 19.9 | 33.1 | 66.2 |
| 1.675 | — | 6.61 | 13.2 | 19.8 | 33.0 | 66.1 |
| 1.676 | — | 6.60 | 13.2 | 19.8 | 33.0 | 66.0 |
| 1.677 | — | 6.59 | 13.2 | 19.8 | 33.0 | 65.9 |
| 1.678 | — | 6.59 | 13.2 | 19.8 | 32.9 | 65.9 |
| 1.679 | — | 6.58 | 13.2 | 19.7 | 32.9 | 65.8 |
| 1.680 | — | 6.57 | 13.1 | 19.7 | 32.8 | 65.7 |
| 1.681 | — | 6.56 | 13.1 | 19.7 | 32.8 | 65.6 |
| 1.682 | — | 6.56 | 13.1 | 19.7 | 32.8 | 65.6 |
| 1.683 | — | 6.55 | 13.1 | 19.6 | 32.7 | 65.5 |
| 1.684 | — | 6.54 | 13.1 | 19.6 | 32.7 | 65.4 |
| 1.685 | — | 6.53 | 13.1 | 19.6 | 32.7 | 65.3 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.686 | — | 6.52 | 13.0 | 19.6 | 32.6 | 65.2 |
| 1.687 | — | 6.52 | 13.0 | 19.5 | 32.6 | 65.2 |
| 1.688 | — | 6.51 | 13.0 | 19.5 | 32.5 | 65.1 |
| 1.689 | — | 6.50 | 13.0 | 19.5 | 32.5 | 65.0 |
| 1.690 | — | 6.49 | 13.0 | 19.5 | 32.5 | 64.9 |
| 1.691 | — | 6.49 | 13.0 | 19.5 | 32.4 | 64.9 |
| 1.692 | — | 6.48 | 13.0 | 19.4 | 32.4 | 64.8 |
| 1.693 | — | 6.47 | 12.9 | 19.4 | 32.3 | 64.7 |
| 1.694 | — | 6.46 | 12.9 | 19.4 | 32.3 | 64.6 |
| 1.695 | — | 6.45 | 12.9 | 19.4 | 32.3 | 64.5 |
| 1.696 | — | 6.45 | 12.9 | 19.3 | 32.2 | 64.5 |
| 1.697 | — | 6.44 | 12.9 | 19.3 | 32.2 | 64.4 |
| 1.698 | — | 6.43 | 12.9 | 19.3 | 32.2 | 64.3 |
| 1.699 | — | 6.42 | 12.8 | 19.3 | 32.1 | 64.2 |
| 1.700 | — | 6.42 | 12.8 | 19.3 | 32.1 | 64.2 |
| 1.701 | — | 6.41 | 12.8 | 19.2 | 32.0 | 64.1 |
| 1.702 | — | 6.40 | 12.8 | 19.2 | 32.0 | 64.0 |
| 1.703 | — | 6.39 | 12.8 | 19.2 | 32.0 | 63.9 |
| 1.704 | — | 6.39 | 12.8 | 19.2 | 31.9 | 63.9 |
| 1.705 | — | 6.38 | 12.8 | 19.1 | 31.9 | 63.8 |
| 1.706 | — | 6.37 | 12.7 | 19.1 | 31.9 | 63.7 |
| 1.707 | — | 6.36 | 12.7 | 19.1 | 31.8 | 63.6 |
| 1.708 | — | 6.36 | 12.7 | 19.1 | 31.8 | 63.6 |
| 1.709 | — | 6.35 | 12.7 | 19.0 | 31.7 | 63.5 |
| 1.710 | — | 6.34 | 12.7 | 19.0 | 31.7 | 63.4 |
| 1.711 | — | 6.33 | 12.7 | 19.0 | 31.7 | 63.3 |
| 1.712 | — | 6.33 | 12.7 | 19.0 | 31.6 | 63.3 |
| 1.713 | — | 6.32 | 12.6 | 19.0 | 31.6 | 63.2 |
| 1.714 | — | 6.31 | 12.6 | 18.9 | 31.6 | 63.1 |
| 1.715 | — | 6.31 | 12.6 | 18.9 | 31.5 | 63.1 |
| 1.716 | — | 6.30 | 12.6 | 18.9 | 31.5 | 63.0 |
| 1.717 | — | 6.29 | 12.6 | 18.9 | 31.4 | 62.9 |
| 1.718 | — | 6.28 | 12.6 | 18.8 | 31.4 | 62.8 |
| 1.719 | — | 6.28 | 12.5 | 18.8 | 31.4 | 62.8 |
| 1.720 | — | 6.27 | 12.5 | 18.8 | 31.3 | 62.7 |
| 1.721 | — | 6.26 | 12.5 | 18.8 | 31.3 | 62.6 |
| 1.722 | — | 6.25 | 12.5 | 18.8 | 31.3 | 62.5 |
| 1.723 | — | 6.25 | 12.5 | 18.7 | 31.2 | 62.5 |
| 1.724 | — | 6.24 | 12.5 | 18.7 | 31.2 | 62.4 |
| 1.725 | — | 6.23 | 12.5 | 18.7 | 31.2 | 62.3 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.726 | — | 6.23 | 12.4 | 18.7 | 31.1 | 62.3 |
| 1.727 | — | 6.22 | 12.4 | 18.7 | 31.1 | 62.2 |
| 1.728 | — | 6.21 | 12.4 | 18.6 | 31.1 | 62.1 |
| 1.729 | — | 6.20 | 12.4 | 18.6 | 31.0 | 62.0 |
| 1.730 | — | 6.20 | 12.4 | 18.6 | 31.0 | 62.0 |
| 1.731 | — | 6.19 | 12.4 | 18.6 | 30.9 | 61.9 |
| 1.732 | — | 6.18 | 12.4 | 18.5 | 30.9 | 61.8 |
| 1.733 | — | 6.17 | 12.3 | 18.5 | 30.9 | 61.7 |
| 1.734 | — | 6.17 | 12.3 | 18.5 | 30.8 | 61.7 |
| 1.735 | — | 6.16 | 12.3 | 18.5 | 30.8 | 61.6 |
| 1.736 | — | 6.15 | 12.3 | 18.5 | 30.8 | 61.5 |
| 1.737 | — | 6.15 | 12.3 | 18.4 | 30.7 | 61.5 |
| 1.738 | — | 6.14 | 12.3 | 18.4 | 30.7 | 61.4 |
| 1.739 | — | 6.13 | 12.3 | 18.4 | 30.7 | 61.3 |
| 1.740 | — | 6.13 | 12.2 | 18.4 | 30.6 | 61.3 |
| 1.741 | — | 6.12 | 12.2 | 18.4 | 30.6 | 61.2 |
| 1.742 | — | 6.11 | 12.2 | 18.3 | 30.6 | 61.1 |
| 1.743 | — | 6.10 | 12.2 | 18.3 | 30.5 | 61.0 |
| 1.744 | — | 6.10 | 12.2 | 18.3 | 30.5 | 61.0 |
| 1.745 | — | 6.09 | 12.2 | 18.3 | 30.4 | 60.9 |
| 1.746 | — | 6.08 | 12.2 | 18.2 | 30.4 | 60.8 |
| 1.747 | — | 6.08 | 12.2 | 18.2 | 30.4 | 60.8 |
| 1.748 | — | 6.07 | 12.1 | 18.2 | 30.3 | 60.7 |
| 1.749 | — | 6.06 | 12.1 | 18.2 | 30.3 | 60.6 |
| 1.750 | — | 6.06 | 12.1 | 18.2 | 30.3 | 60.6 |
| 1.751 | — | 6.05 | 12.1 | 18.1 | 30.2 | 60.5 |
| 1.752 | — | 6.04 | 12.1 | 18.1 | 30.2 | 60.4 |
| 1.753 | — | 6.03 | 12.1 | 18.1 | 30.2 | 60.3 |
| 1.754 | — | 6.03 | 12.1 | 18.1 | 30.1 | 60.3 |
| 1.755 | — | 6.02 | 12.0 | 18.1 | 30.1 | 60.2 |
| 1.756 | — | 6.01 | 12.0 | 18.0 | 30.1 | 60.1 |
| 1.757 | — | 6.01 | 12.0 | 18.0 | 30.0 | 60.1 |
| 1.758 | — | 6.00 | 12.0 | 18.0 | 30.0 | 60.0 |
| 1.759 | — | 5.99 | 12.0 | 18.0 | 30.0 | 59.9 |
| 1.760 | — | 5.99 | 12.0 | 18.0 | 29.9 | 59.9 |
| 1.761 | — | 5.98 | 12.0 | 17.9 | 29.9 | 59.8 |
| 1.762 | — | 5.97 | 11.9 | 17.9 | 29.9 | 59.7 |
| 1.763 | — | 5.97 | 11.9 | 17.9 | 29.8 | 59.7 |
| 1.764 | — | 5.96 | 11.9 | 17.9 | 29.8 | 59.6 |
| 1.765 | — | 5.95 | 11.9 | 17.9 | 29.8 | 59.5 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.766 | — | 5.95 | 11.9 | 17.8 | 29.7 | 59.5 |
| 1.767 | — | 5.94 | 11.9 | 17.8 | 29.7 | 59.4 |
| 1.768 | — | 5.93 | 11.9 | 17.8 | 29.7 | 59.3 |
| 1.769 | — | 5.93 | 11.8 | 17.8 | 29.6 | 59.3 |
| 1.770 | — | 5.92 | 11.8 | 17.8 | 29.6 | 59.2 |
| 1.771 | — | 5.91 | 11.8 | 17.7 | 29.6 | 59.1 |
| 1.772 | — | 5.91 | 11.8 | 17.7 | 29.5 | 59.1 |
| 1.773 | — | 5.90 | 11.8 | 17.7 | 29.5 | 59.0 |
| 1.774 | — | 5.89 | 11.8 | 17.7 | 29.5 | 58.9 |
| 1.775 | — | 5.89 | 11.8 | 17.7 | 29.4 | 58.9 |
| 1.776 | — | 5.88 | 11.8 | 17.6 | 29.4 | 58.8 |
| 1.777 | — | 5.87 | 11.7 | 17.6 | 29.4 | 58.7 |
| 1.778 | — | 5.87 | 11.7 | 17.6 | 29.3 | 58.7 |
| 1.779 | — | 5.86 | 11.7 | 17.6 | 29.3 | 58.6 |
| 1.780 | — | 5.85 | 11.7 | 17.6 | 29.3 | 58.5 |
| 1.781 | — | 5.85 | 11.7 | 17.5 | 29.2 | 58.5 |
| 1.782 | — | 5.84 | 11.7 | 17.5 | 29.2 | 58.4 |
| 1.783 | — | 5.83 | 11.7 | 17.5 | 29.2 | 58.3 |
| 1.784 | — | 5.83 | 11.7 | 17.5 | 29.1 | 58.3 |
| 1.785 | — | 5.82 | 11.6 | 17.5 | 29.1 | 58.2 |
| 1.786 | — | 5.81 | 11.6 | 17.4 | 29.1 | 58.1 |
| 1.787 | — | 5.81 | 11.6 | 17.4 | 29.0 | 58.1 |
| 1.788 | — | 5.80 | 11.6 | 17.4 | 29.0 | 58.0 |
| 1.789 | — | 5.79 | 11.6 | 17.4 | 29.0 | 57.9 |
| 1.790 | — | 5.79 | 11.6 | 17.4 | 28.9 | 57.9 |
| 1.791 | — | 5.78 | 11.6 | 17.3 | 28.9 | 57.8 |
| 1.792 | — | 5.77 | 11.5 | 17.3 | 28.9 | 57.7 |
| 1.793 | — | 5.77 | 11.5 | 17.3 | 28.8 | 57.7 |
| 1.794 | — | 5.76 | 11.5 | 17.3 | 28.8 | 57.6 |
| 1.795 | — | 5.76 | 11.5 | 17.3 | 28.8 | 57.6 |
| 1.796 | — | 5.75 | 11.5 | 17.2 | 28.7 | 57.5 |
| 1.797 | — | 5.74 | 11.5 | 17.2 | 28.7 | 57.4 |
| 1.798 | — | 5.74 | 11.5 | 17.2 | 28.7 | 57.4 |
| 1.799 | — | 5.73 | 11.5 | 17.2 | 28.6 | 57.3 |
| 1.800 | — | 5.72 | 11.4 | 17.2 | 28.6 | 57.2 |
| 1.801 | — | 5.72 | 11.4 | 17.2 | 28.6 | 57.2 |
| 1.802 | — | 5.71 | 11.4 | 17.1 | 28.6 | 57.1 |
| 1.803 | — | 5.70 | 11.4 | 17.1 | 28.5 | 57.0 |
| 1.804 | — | 5.70 | 11.4 | 17.1 | 28.5 | 57.0 |
| 1.805 | — | 5.69 | 11.4 | 17.1 | 28.5 | 56.9 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.806 | — | 5.69 | 11.4 | 17.1 | 28.4 | 56.9 |
| 1.807 | — | 5.68 | 11.4 | 17.0 | 28.4 | 56.8 |
| 1.808 | — | 5.67 | 11.3 | 17.0 | 28.4 | 56.7 |
| 1.809 | — | 5.67 | 11.3 | 17.0 | 28.3 | 56.7 |
| 1.810 | — | 5.66 | 11.3 | 17.0 | 28.3 | 56.6 |
| 1.811 | — | 5.65 | 11.3 | 17.0 | 28.3 | 56.5 |
| 1.812 | — | 5.65 | 11.3 | 16.9 | 28.2 | 56.5 |
| 1.813 | — | 5.64 | 11.3 | 16.9 | 28.2 | 56.4 |
| 1.814 | — | 5.64 | 11.3 | 16.9 | 28.2 | 56.4 |
| 1.815 | — | 5.63 | 11.3 | 16.9 | 28.1 | 56.3 |
| 1.816 | — | 5.62 | 11.2 | 16.9 | 28.1 | 56.2 |
| 1.817 | — | 5.62 | 11.2 | 16.9 | 28.1 | 56.2 |
| 1.818 | — | 5.61 | 11.2 | 16.8 | 28.1 | 56.1 |
| 1.819 | — | 5.60 | 11.2 | 16.8 | 28.0 | 56.0 |
| 1.820 | — | 5.60 | 11.2 | 16.8 | 28.0 | 56.0 |
| 1.821 | — | 5.59 | 11.2 | 16.8 | 28.0 | 55.9 |
| 1.822 | — | 5.59 | 11.2 | 16.8 | 27.9 | 55.9 |
| 1.823 | — | 5.58 | 11.2 | 16.7 | 27.9 | 55.8 |
| 1.824 | — | 5.57 | 11.1 | 16.7 | 27.9 | 55.7 |
| 1.825 | — | 5.57 | 11.1 | 16.7 | 27.8 | 55.7 |
| 1.826 | — | 5.56 | 11.1 | 16.7 | 27.8 | 55.6 |
| 1.827 | — | 5.56 | 11.1 | 16.7 | 27.8 | 55.6 |
| 1.828 | — | 5.55 | 11.1 | 16.6 | 27.7 | 55.5 |
| 1.829 | — | 5.54 | 11.1 | 16.6 | 27.7 | 55.4 |
| 1.830 | — | 5.54 | 11.1 | 16.6 | 27.7 | 55.4 |
| 1.831 | — | 5.53 | 11.1 | 16.6 | 27.7 | 55.3 |
| 1.832 | — | 5.53 | 11.0 | 16.6 | 27.6 | 55.3 |
| 1.833 | — | 5.52 | 11.0 | 16.6 | 27.6 | 55.2 |
| 1.834 | — | 5.51 | 11.0 | 16.5 | 27.6 | 55.1 |
| 1.835 | — | 5.51 | 11.0 | 16.5 | 27.5 | 55.1 |
| 1.836 | — | 5.50 | 11.0 | 16.5 | 27.5 | 55.0 |
| 1.837 | — | 5.50 | 11.0 | 16.5 | 27.5 | 55.0 |
| 1.838 | — | 5.49 | 11.0 | 16.5 | 27.4 | 54.9 |
| 1.839 | — | 5.48 | 11.0 | 16.5 | 27.4 | 54.8 |
| 1.840 | — | 5.48 | 11.0 | 16.4 | 27.4 | 54.8 |
| 1.841 | — | 5.47 | 10.9 | 16.4 | 27.4 | 54.7 |
| 1.842 | — | 5.47 | 10.9 | 16.4 | 27.3 | 54.7 |
| 1.843 | — | 5.46 | 10.9 | 16.4 | 27.3 | 54.6 |
| 1.844 | — | 5.45 | 10.9 | 16.4 | 27.3 | 54.5 |
| 1.845 | — | 5.45 | 10.9 | 16.3 | 27.2 | 54.5 |

（续）

| 平均压痕直径 d/mm | 试验力 F/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.846 | — | 5.44 | 10.9 | 16.3 | 27.2 | 54.4 |
| 1.847 | — | 5.44 | 10.9 | 16.3 | 27.2 | 54.4 |
| 1.848 | — | 5.43 | 10.9 | 16.3 | 27.1 | 54.3 |
| 1.849 | — | 5.42 | 10.8 | 16.3 | 27.1 | 54.2 |
| 1.850 | — | 5.42 | 10.8 | 16.3 | 27.1 | 54.2 |
| 1.851 | — | 5.41 | 10.8 | 16.2 | 27.1 | 54.1 |
| 1.852 | — | 5.41 | 10.8 | 16.2 | 27.0 | 54.1 |
| 1.853 | — | 5.40 | 10.8 | 16.2 | 27.0 | 54.0 |
| 1.854 | — | 5.40 | 10.8 | 16.2 | 27.0 | 54.0 |
| 1.855 | — | 5.39 | 10.8 | 16.2 | 26.9 | 53.9 |
| 1.856 | — | 5.38 | 10.8 | 16.2 | 26.9 | 53.8 |
| 1.857 | — | 5.38 | 10.8 | 16.1 | 26.9 | 53.8 |
| 1.858 | — | 5.37 | 10.7 | 16.1 | 26.9 | 53.7 |
| 1.859 | — | 5.37 | 10.7 | 16.1 | 26.8 | 53.7 |
| 1.860 | — | 5.36 | 10.7 | 16.1 | 26.8 | 53.6 |
| 1.861 | — | 5.35 | 10.7 | 16.1 | 26.8 | 53.5 |
| 1.862 | — | 5.35 | 10.7 | 16.0 | 26.7 | 53.5 |
| 1.863 | — | 5.34 | 10.7 | 16.0 | 26.7 | 53.4 |
| 1.864 | — | 5.34 | 10.7 | 16.0 | 26.7 | 53.4 |
| 1.865 | — | 5.33 | 10.7 | 16.0 | 26.7 | 53.3 |
| 1.866 | — | 5.33 | 10.6 | 16.0 | 26.6 | 53.3 |
| 1.867 | — | 5.32 | 10.6 | 16.0 | 26.6 | 53.2 |
| 1.868 | — | 5.31 | 10.6 | 15.9 | 26.6 | 53.1 |
| 1.869 | — | 5.31 | 10.6 | 15.9 | 26.5 | 53.1 |
| 1.870 | — | 5.30 | 10.6 | 15.9 | 26.5 | 53.0 |
| 1.871 | — | 5.30 | 10.6 | 15.9 | 26.5 | 53.0 |
| 1.872 | — | 5.29 | 10.6 | 15.9 | 26.5 | 52.9 |
| 1.873 | — | 5.29 | 10.6 | 15.9 | 26.4 | 52.9 |
| 1.874 | — | 5.28 | 10.6 | 15.8 | 26.4 | 52.8 |
| 1.875 | — | 5.28 | 10.5 | 15.8 | 26.4 | 52.8 |
| 1.876 | — | 5.27 | 10.5 | 15.8 | 26.3 | 52.7 |
| 1.877 | — | 5.26 | 10.5 | 15.8 | 26.3 | 52.6 |
| 1.878 | — | 5.26 | 10.5 | 15.8 | 26.3 | 52.6 |
| 1.879 | — | 5.25 | 10.5 | 15.8 | 26.3 | 52.5 |
| 1.880 | — | 5.25 | 10.5 | 15.7 | 26.2 | 52.5 |
| 1.881 | — | 5.24 | 10.5 | 15.7 | 26.2 | 52.4 |
| 1.882 | — | 5.24 | 10.5 | 15.7 | 26.2 | 52.4 |
| 1.883 | — | 5.23 | 10.5 | 15.7 | 26.1 | 52.3 |
| 1.884 | — | 5.22 | 10.4 | 15.7 | 26.1 | 52.2 |
| 1.885 | — | 5.22 | 10.4 | 15.7 | 26.1 | 52.2 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.886 | — | 5.21 | 10.4 | 15.6 | 26.1 | 52.1 |
| 1.887 | — | 5.21 | 10.4 | 15.6 | 26.0 | 52.1 |
| 1.888 | — | 5.20 | 10.4 | 15.6 | 26.0 | 52.0 |
| 1.889 | — | 5.20 | 10.4 | 15.6 | 26.0 | 52.0 |
| 1.890 | — | 5.19 | 10.4 | 15.6 | 26.0 | 51.9 |
| 1.891 | — | 5.19 | 10.4 | 15.6 | 25.9 | 51.9 |
| 1.892 | — | 5.18 | 10.4 | 15.5 | 25.9 | 51.8 |
| 1.893 | — | 5.18 | 10.3 | 15.5 | 25.9 | 51.8 |
| 1.894 | — | 5.17 | 10.3 | 15.5 | 25.8 | 51.7 |
| 1.895 | — | 5.16 | 10.3 | 15.5 | 25.8 | 51.6 |
| 1.896 | — | 5.16 | 10.3 | 15.5 | 25.8 | 51.6 |
| 1.897 | — | 5.15 | 10.3 | 15.5 | 25.8 | 51.5 |
| 1.898 | — | 5.15 | 10.3 | 15.4 | 25.7 | 51.5 |
| 1.899 | — | 5.14 | 10.3 | 15.4 | 25.7 | 51.4 |
| 1.900 | — | 5.14 | 10.3 | 15.4 | 25.7 | 51.4 |
| 1.901 | — | 5.13 | 10.3 | 15.4 | 25.7 | 51.3 |
| 1.902 | — | 5.13 | 10.3 | 15.4 | 25.6 | 51.3 |
| 1.903 | — | 5.12 | 10.2 | 15.4 | 25.6 | 51.2 |
| 1.904 | — | 5.12 | 10.2 | 15.3 | 25.6 | 51.2 |
| 1.905 | — | 5.11 | 10.2 | 15.3 | 25.5 | 51.1 |
| 1.906 | — | 5.10 | 10.2 | 15.3 | 25.5 | 51.0 |
| 1.907 | — | 5.10 | 10.2 | 15.3 | 25.5 | 51.0 |
| 1.908 | — | 5.09 | 10.2 | 15.3 | 25.5 | 50.9 |
| 1.909 | — | 5.09 | 10.2 | 15.3 | 25.4 | 50.9 |
| 1.910 | — | 5.08 | 10.2 | 15.2 | 25.4 | 50.8 |
| 1.911 | — | 5.08 | 10.2 | 15.2 | 25.4 | 50.8 |
| 1.912 | — | 5.07 | 10.1 | 15.2 | 25.4 | 50.7 |
| 1.913 | — | 5.07 | 10.1 | 15.2 | 25.3 | 50.7 |
| 1.914 | — | 5.06 | 10.1 | 15.2 | 25.3 | 50.6 |
| 1.915 | — | 5.06 | 10.1 | 15.2 | 25.3 | 50.6 |
| 1.916 | — | 5.05 | 10.1 | 15.2 | 25.3 | 50.5 |
| 1.917 | — | 5.05 | 10.1 | 15.1 | 25.2 | 50.5 |
| 1.918 | — | 5.04 | 10.1 | 15.1 | 25.2 | 50.4 |
| 1.919 | — | 5.04 | 10.1 | 15.1 | 25.2 | 50.4 |
| 1.920 | — | 5.03 | 10.1 | 15.1 | 25.2 | 50.3 |
| 1.921 | — | 5.03 | 10.0 | 15.1 | 25.1 | 50.3 |
| 1.922 | — | 5.02 | 10.0 | 15.1 | 25.1 | 50.2 |
| 1.923 | — | 5.01 | 10.0 | 15.0 | 25.1 | 50.1 |
| 1.924 | — | 5.01 | 10.0 | 15.0 | 25.0 | 50.1 |
| 1.925 | — | 5.00 | 10.0 | 15.0 | 25.0 | 50.0 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.926 | — | 5.00 | 10.0 | 15.0 | 25.0 | 50.0 |
| 1.927 | — | 4.99 | 9.99 | 15.0 | 25.0 | 49.9 |
| 1.928 | — | 4.99 | 9.98 | 15.0 | 24.9 | 49.9 |
| 1.929 | — | 4.98 | 9.97 | 15.0 | 24.9 | 49.8 |
| 1.930 | — | — | 9.96 | 14.9 | 24.9 | 49.8 |
| 1.931 | — | — | 9.94 | 14.9 | 24.9 | 49.7 |
| 1.932 | — | — | 9.93 | 14.9 | 24.8 | 49.7 |
| 1.933 | — | — | 9.92 | 14.9 | 24.8 | 49.6 |
| 1.934 | — | — | 9.91 | 14.9 | 24.8 | 49.6 |
| 1.935 | — | — | 9.90 | 14.9 | 24.8 | 49.5 |
| 1.936 | — | — | 9.89 | 14.8 | 24.7 | 49.5 |
| 1.937 | — | — | 9.88 | 14.8 | 24.7 | 49.4 |
| 1.938 | — | — | 9.87 | 14.8 | 24.7 | 49.4 |
| 1.939 | — | — | 9.86 | 14.8 | 24.7 | 49.3 |
| 1.940 | — | — | 9.85 | 14.8 | 24.6 | 49.3 |
| 1.941 | — | — | 9.84 | 14.8 | 24.6 | 49.2 |
| 1.942 | — | — | 9.83 | 14.8 | 24.6 | 49.2 |
| 1.943 | — | — | 9.82 | 14.7 | 24.6 | 49.1 |
| 1.944 | — | — | 9.81 | 14.7 | 24.5 | 49.1 |
| 1.945 | — | — | 9.80 | 14.7 | 24.5 | 49.0 |
| 1.946 | — | — | 9.79 | 14.7 | 24.5 | 49.0 |
| 1.947 | — | — | 9.78 | 14.7 | 24.5 | 48.9 |
| 1.948 | — | — | 9.77 | 14.7 | 24.4 | 48.9 |
| 1.949 | — | — | 9.76 | 14.6 | 24.4 | 48.8 |
| 1.950 | — | — | 9.75 | 14.6 | 24.4 | 48.8 |
| 1.951 | — | — | 9.74 | 14.6 | 24.4 | 48.7 |
| 1.952 | — | — | 9.73 | 14.6 | 24.3 | 48.7 |
| 1.953 | — | — | 9.72 | 14.6 | 24.3 | 48.6 |
| 1.954 | — | — | 9.71 | 14.6 | 24.3 | 48.6 |
| 1.955 | — | — | 9.70 | 14.6 | 24.3 | 48.5 |
| 1.956 | — | — | 9.69 | 14.5 | 24.2 | 48.5 |
| 1.957 | — | — | 9.68 | 14.5 | 24.2 | 48.4 |
| 1.958 | — | — | 9.67 | 14.5 | 24.2 | 48.4 |
| 1.959 | — | — | 9.66 | 14.5 | 24.2 | 48.3 |
| 1.960 | — | — | 9.65 | 14.5 | 24.1 | 48.3 |
| 1.961 | — | — | 9.64 | 14.5 | 24.1 | 48.2 |
| 1.962 | — | — | 9.63 | 14.5 | 24.1 | 48.2 |
| 1.963 | — | — | 9.62 | 14.4 | 24.1 | 48.1 |
| 1.964 | — | — | 9.61 | 14.4 | 24.0 | 48.1 |
| 1.965 | — | — | 9.60 | 14.4 | 24.0 | 48.0 |

（续）

| 平均压痕直径 $d$/mm | 试验力 $F$/N | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 49.03 | 98.07 | 196.1 | 294.2 | 490.3 | 980.7 |
| | 维氏硬度 | | | | | |
| | HV5 | HV10 | HV20 | HV30 | HV50 | HV100 |
| 1.966 | — | | 9.59 | 14.4 | 24.0 | 48.0 |
| 1.967 | — | — | 9.58 | 14.4 | 24.0 | 47.9 |
| 1.968 | — | — | 9.57 | 14.4 | 23.9 | 47.9 |
| 1.969 | — | — | 9.56 | 14.3 | 23.9 | 47.8 |
| 1.970 | — | — | 9.56 | 14.3 | 23.9 | 47.8 |
| 1.971 | — | — | 9.55 | 14.3 | 23.9 | 47.7 |
| 1.972 | — | — | 9.54 | 14.3 | 23.8 | 47.7 |
| 1.973 | — | — | 9.53 | 14.3 | 23.8 | 47.6 |
| 1.974 | — | — | 9.52 | 14.3 | 23.8 | 47.6 |
| 1.975 | — | — | 9.51 | 14.3 | 23.8 | 47.5 |
| 1.976 | — | — | 9.50 | 14.2 | 23.7 | 47.5 |
| 1.977 | — | — | 9.49 | 14.2 | 23.7 | 47.4 |
| 1.978 | — | — | 9.48 | 14.2 | 23.7 | 47.4 |
| 1.979 | — | — | 9.47 | 14.2 | 23.7 | 47.4 |
| 1.980 | — | — | 9.46 | 14.2 | 23.6 | 47.3 |
| 1.981 | — | — | 9.45 | 14.2 | 23.6 | 47.3 |
| 1.982 | — | — | 9.44 | 14.2 | 23.6 | 47.2 |
| 1.983 | — | — | 9.43 | 14.1 | 23.6 | 47.2 |
| 1.984 | — | — | 9.42 | 14.1 | 23.5 | 47.1 |
| 1.985 | — | — | 9.41 | 14.1 | 23.5 | 47.1 |
| 1.986 | — | — | 9.40 | 14.1 | 23.5 | 47.0 |
| 1.987 | — | — | 9.39 | 14.1 | 23.5 | 47.0 |
| 1.988 | — | — | 9.38 | 14.1 | 23.5 | 46.9 |
| 1.989 | — | — | 9.37 | 14.1 | 23.4 | 46.9 |
| 1.990 | — | — | 9.36 | 14.0 | 23.4 | 46.8 |
| 1.991 | — | — | 9.35 | 14.0 | 23.4 | 46.8 |
| 1.992 | — | — | 9.35 | 14.0 | 23.4 | 46.7 |
| 1.993 | — | — | 9.34 | 14.0 | 23.3 | 46.7 |
| 1.994 | — | — | 9.33 | 14.0 | 23.3 | 46.6 |
| 1.995 | — | — | 9.32 | 14.0 | 23.3 | 46.6 |
| 1.996 | — | — | 9.31 | 14.0 | 23.3 | 46.5 |
| 1.997 | — | — | 9.30 | 14.0 | 23.2 | 46.5 |
| 1.998 | — | — | 9.29 | 13.9 | 23.2 | 46.5 |
| 1.999 | — | — | 9.28 | 13.9 | 23.2 | 46.4 |

6）对于在曲面试样上试验的结果，要按表3-17～表3-22进行修正，即用原计算值（或查阅值）乘以表中的系数。

表 3-17　在凸球面上进行试验时的修正系数

| *d/D* | 修正系数 | *d/D* | 修正系数 |
|---|---|---|---|
| 0. 004 | 0. 995 | 0. 086 | 0. 920 |
| 0. 009 | 0. 990 | 0. 093 | 0. 915 |
| 0. 013 | 0. 985 | 0. 100 | 0. 910 |
| 0. 018 | 0. 980 | 0. 107 | 0. 905 |
| 0. 023 | 0. 975 | 0. 114 | 0. 900 |
| 0. 028 | 0. 970 | 0. 122 | 0. 895 |
| 0. 033 | 0. 965 | 0. 130 | 0. 890 |
| 0. 038 | 0. 960 | 0. 139 | 0. 885 |
| 0. 043 | 0. 955 | 0. 147 | 0. 880 |
| 0. 049 | 0. 950 | 0. 156 | 0. 875 |
| 0. 055 | 0. 945 | 0. 165 | 0. 870 |
| 0. 061 | 0. 940 | 0. 175 | 0. 865 |
| 0. 067 | 0. 935 | 0. 185 | 0. 860 |
| 0. 073 | 0. 930 | 0. 195 | 0. 855 |
| 0. 079 | 0. 925 | 0. 206 | 0. 850 |

表 3-18　在凹球面上进行试验时的修正系数

| *d/D* | 修正系数 | *d/D* | 修正系数 |
|---|---|---|---|
| 0. 004 | 1. 005 | 0. 057 | 1. 080 |
| 0. 008 | 1. 010 | 0. 060 | 1. 085 |
| 0. 012 | 1. 015 | 0. 063 | 1. 090 |
| 0. 016 | 1. 020 | 0. 066 | 1. 095 |
| 0. 020 | 1. 025 | 0. 069 | 1. 100 |
| 0. 024 | 1. 030 | 0. 071 | 1. 105 |
| 0. 028 | 1. 035 | 0. 074 | 1. 110 |
| 0. 031 | 1. 040 | 0. 077 | 1. 115 |
| 0. 035 | 1. 045 | 0. 079 | 1. 120 |
| 0. 038 | 1. 050 | 0. 082 | 1. 125 |
| 0. 041 | 1. 055 | 0. 084 | 1. 130 |
| 0. 045 | 1. 060 | 0. 087 | 1. 135 |
| 0. 048 | 1. 065 | 0. 089 | 1. 140 |
| 0. 051 | 1. 070 | 0. 091 | 1. 145 |
| 0. 054 | 1. 075 | 0. 094 | 1. 150 |

表 3-19　在凸圆柱面（一对角线与圆柱轴线呈 45°）上进行试验时的修正系数

| *d/D* | 修正系数 | *d/D* | 修正系数 |
|---|---|---|---|
| 0. 009 | 0. 995 | 0. 109 | 0. 940 |
| 0. 017 | 0. 990 | 0. 119 | 0. 935 |
| 0. 026 | 0. 985 | 0. 129 | 0. 930 |
| 0. 035 | 0. 980 | 0. 139 | 0. 925 |
| 0. 044 | 0. 975 | 0. 149 | 0. 920 |
| 0. 053 | 0. 970 | 0. 159 | 0. 915 |
| 0. 062 | 0. 965 | 0. 169 | 0. 910 |
| 0. 071 | 0. 960 | 0. 179 | 0. 905 |
| 0. 081 | 0. 955 | 0. 189 | 0. 900 |
| 0. 090 | 0. 950 | 0. 200 | 0. 895 |
| 0. 100 | 0. 945 | | |

**表 3-20　在凹圆柱面（一对角线与圆柱轴线呈 45°）上进行试验时的修正系数**

| $d/D$ | 修正系数 | $d/D$ | 修正系数 |
|---|---|---|---|
| 0.009 | 1.005 | 0.127 | 1.080 |
| 0.017 | 1.010 | 0.134 | 1.085 |
| 0.025 | 1.015 | 0.141 | 1.090 |
| 0.034 | 1.020 | 0.148 | 1.095 |
| 0.042 | 1.025 | 0.155 | 1.100 |
| 0.050 | 1.030 | 0.162 | 1.105 |
| 0.058 | 1.035 | 0.169 | 1.110 |
| 0.066 | 1.040 | 0.176 | 1.115 |
| 0.074 | 1.045 | 0.183 | 1.120 |
| 0.082 | 1.050 | 0.189 | 1.125 |
| 0.089 | 1.055 | 0.196 | 1.130 |
| 0.097 | 1.060 | 0.203 | 1.135 |
| 0.104 | 1.065 | 0.209 | 1.140 |
| 0.112 | 1.070 | 0.216 | 1.145 |
| 0.119 | 1.075 | 0.222 | 1.150 |

**表 3-21　在凸圆柱面（一对角线平行于圆柱轴线）上进行试验时的修正系数**

| $d/D$ | 修正系数 | $d/D$ | 修正系数 |
|---|---|---|---|
| 0.009 | 0.995 | 0.085 | 0.965 |
| 0.019 | 0.990 | 0.104 | 0.960 |
| 0.029 | 0.985 | 0.126 | 0.955 |
| 0.041 | 0.980 | 0.153 | 0.950 |
| 0.054 | 0.975 | 0.189 | 0.945 |
| 0.068 | 0.970 | 0.243 | 0.940 |

**表 3-22　在凹圆柱面（一对角线平行于圆柱轴线）上进行试验时的修正系数**

| $d/D$ | 修正系数 | $d/D$ | 修正系数 |
|---|---|---|---|
| 0.008 | 1.005 | 0.087 | 1.080 |
| 0.016 | 1.010 | 0.090 | 1.085 |
| 0.023 | 1.105 | 0.093 | 1.090 |
| 0.030 | 1.020 | 0.097 | 1.095 |
| 0.036 | 1.025 | 0.100 | 1.100 |
| 0.042 | 1.030 | 0.103 | 1.105 |
| 0.048 | 1.035 | 0.105 | 1.110 |
| 0.053 | 1.040 | 0.108 | 1.115 |
| 0.058 | 1.045 | 0.111 | 1.120 |
| 0.063 | 1.050 | 0.113 | 1.125 |
| 0.067 | 1.055 | 0.116 | 1.130 |
| 0.071 | 1.060 | 0.118 | 1.135 |
| 0.076 | 1.065 | 0.120 | 1.140 |
| 0.079 | 1.070 | 0.123 | 1.145 |
| 0.083 | 1.075 | 0.125 | 1.150 |

## 3.5　金属材料努氏硬度试验

金属材料努氏硬度试验按照 GB/T 18449.1—2009《金属材料　努氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》、GB/T 18849.2—2012《金属材料　努氏硬度试验　第 2 部分：硬度计的检验与校准》、GB/T 18449.3—2012《金属材料　努氏硬度试验　第 3 部分：标准硬度块的标定》和 GB/T 18449.4—2009《金属材料　努氏硬度试验　第 4 部分：硬度值表》进行。

### 3.5.1　试样

1）应在平坦光滑的试样表面上进行试验，试样表面应抛光，并应无氧化皮及外界污物，尤其不应有油脂。在各种试验条件下，压痕周边均应清晰地出现在显微镜视场中。试样表面应保证精确测量压痕对角线长度的测定。

2）制备试样时应采取措施，使由于发热或冷加工等因素对试样表面硬度的影响减至最小。

3）由于努氏硬度压痕很浅，在准备样品时应采取特殊措施。推荐根据被测材料选取适合的抛光和电解抛光技术。

4）试验后，试样背面不应出现可见变形。

5）对于小横截面或形状不规则的试样，可使用类似镶嵌的辅助支承，保证在加力过程中试样不发生移动。

### 3.5.2　试验设备

努氏硬度试验没有专门的硬度计，通常是共用显微维氏硬度计，只要更换压头并改变硬度值的算法即可。一般施加预定试验力或 $98.07\times10^{-3}\sim19.614$N 的试验力。

努氏硬度压痕测量装置应符合 GB/T 18449.2 的相应要求。压痕测量装置应能将对角线放大到视场的 25% ~75%。

测量系统报出的对角线长度应精确至 0.1μm。

使用者应在使用硬度计之前，对其使用的硬度标尺或范围进行检查。

日常检查之前，对于每个范围/标尺和硬度水平，应使用依照 GB/T 18449.3 标定过的标准硬度块上的标准压痕进行压痕测量装置的间接检验。压痕测量值应与标准硬度块证书上的标准值相差在 0.5% 和 0.4μm（取两者中的较大值）以内。如果测量装置不能满足上述要求，应采取相应措施。

日常检查应在按照 GB/T 18449.3 标定的标准硬度块上至少打一个压痕。如果测量的硬度（平均）值与标准硬度块标准值的差值在 GB/T 18449.2 中给出的允许误差之内，则硬度计被认为是满意的；如果超出允许误差，应立即进行间接检验。所测数据应当保存一段时间，以便监测硬度计的再现性和测量设备的稳定性。

### 3.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在 10～35℃的温度下进行。对于温度要求严格的试验，应控制在 23℃±5℃之内。

2）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，以避免试样产生位移。

3）试验过程中，硬度计应避免受到冲击和振动。

4）每个试样上的试验点数不少于 4 点，第 1 点不计。

5）不同条件下的试验力如表 3-23 所示。

**表 3-23　不同条件下的试验力**

| 硬 度 符 号 | 试验力值 $F$ | |
| --- | --- | --- |
| | N | 近似的 kgf① 当量数 |
| HK0. 01 | 0. 09807 | 0. 010 |
| HK0. 02 | 0. 1961 | 0. 020 |
| HK0. 025 | 0. 2452 | 0. 025 |
| HK0. 05 | 0. 4903 | 0. 050 |
| HK0. 1 | 0. 9807 | 0. 100 |
| HK0. 2 | 1. 961 | 0. 200 |
| HK0. 3 | 2. 942 | 0. 300 |
| HK0. 5 | 4. 903 | 0. 500 |
| HK1 | 9. 807 | 1. 000 |
| HK2 | 19. 614 | 2. 000 |

① kgf 不是国际单位制单位。

**2. 试验原理**

将顶部两相对面具有规定角度的菱形棱锥体金刚石压头用试验力 $F$ 压入试样表面，经规定保持时间后卸除试验力，测量试样表面压痕长对角线的长度，如图 3-10 和图 3-11 所示。努氏硬度与试验力除以压痕投影面积所得的商成正比，压痕被视为具有与压头顶部角度相同的菱形基面棱锥体形状。

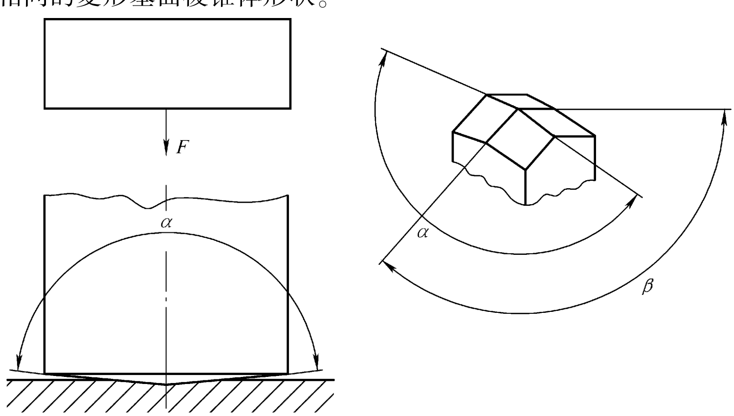



图 3-10　努氏硬度的压头

努氏硬度的计算如下：

$$努氏硬度=0.102\times\frac{F}{A}=0.102\times\frac{F}{d^2c}$$

$$\approx 0.102\times\frac{F}{0.07028d^2}\approx\frac{1.451F}{d^2}$$

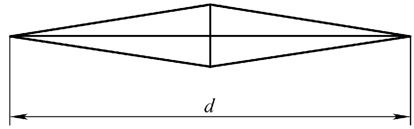



图 3-11　努氏硬度压痕

即努氏硬度的计算公式为

$$努氏硬度=\frac{1.451F}{d^2}$$

式中　0.102——试验力单位由 kgf 更换为 N 后需要乘以的系数，即 $1/g=1/9.80665=0.102$（$g$ 标准重加速度）；

$F$——试验力，单位为 N；

$A$——压痕投影面积，单位为 $mm^2$。

$d$——压痕长对角线长度，单位为 mm；

$c$——压头常数，$c=\tan(\beta/2)/[2\tan(\alpha/2)]$，其中，$\alpha$、$\beta$ 是相对棱边之间的夹角，分别为 172.5°±0.1°、130°±0.1°。

**3. 硬度值的表示**

努氏硬度用 HK 表示，符号之前为硬度值，符号之后依次为表示试验力的数字（见表 3-23）、试验力保持时间（10～15s 不标注）。例如：640HK0.1 表示在试验力为 0.9807N（0.1kgf）下保持 10～15s 测定的努氏硬度值为 640；640HK0.1/20 表示在试验力为 0.9807N（0.1kgf）下保持 20s 测定的努氏硬度值为 640。

**4. 试验程序**

1）使压头与试样表面接触，垂直于试验面施加试验力，加力过程中不应有冲击和振动，直至将试验力施加至规定值。从加力开始至全部试验力施加完毕的时间应不超过 10s，压头下降速度应在 15～70μm/s 之间。

2）试验力保持时间为 10～15s。对于特殊材料，试验力保持时间可以延长，但误差应在 ±2s 之内。

3）在整个试验期间，硬度计应避免受到冲击和振动。

4）任一压痕中心距试样边缘距离，至少应为短压痕对角线长度的 3 倍。

5）肩并肩的两相邻压痕之间的最小距离至少应为压痕短对角线长度的 2.5 倍，头碰头的两相邻压痕之间的最小距离至少应为压痕长对角线长度的 1 倍。如果两压痕的大小不同，压痕之间的最小距离至少应为较大压痕短对角线长度的 1 倍。

6）测量压痕长对角线的长度，用长对角线的长度计算努氏硬度。对于所有试验，压痕的周边在显微镜的视场里应被清晰地定义。降低试验力也就增加了测量结果的分散性。这尤其适用于低力值的努氏硬度试验，在测量长压痕对角线时将出现主要缺陷。

7）压痕测量装置应能将对角线放大到视场的 25%～75%。

8）如果长压痕对角线的一半与另一半相差超过 10%，应检查试样测量表面与支撑表面之间的平行度，最终保证压头与试样之间的同轴性。试验结果偏差超过 10% 的应该舍弃。

9）平面努氏硬度值的计算如表 3-24 所示。

**表 3-24　平面努氏硬度值的计算**

| 压痕对角线 $d$/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0200 | 355.8 | 711.3 | 889.5 | 1779 | — | — | — | — | — |
| 0.0202 | 348.7 | 697.2 | 872.0 | 1743 | — | — | — | — | — |
| 0.0204 | 341.9 | 683.6 | 855.0 | 1709 | — | — | — | — | — |
| 0.0206 | 335.3 | 670.4 | 838.4 | 1676 | — | — | — | — | — |
| 0.0208 | 328.9 | 657.6 | 822.4 | 1644 | — | — | — | — | — |
| 0.0210 | 322.7 | 645.1 | 806.8 | 1613 | — | — | — | — | — |
| 0.0212 | 316.6 | 633.0 | 791.7 | 1583 | — | — | — | — | — |
| 0.0214 | 310.7 | 621.2 | 776.9 | 1553 | — | — | — | — | — |
| 0.0216 | 305.0 | 609.8 | 762.6 | 1525 | — | — | — | — | — |
| 0.0218 | 299.4 | 598.6 | 748.7 | 1497 | 2994 | — | — | — | — |
| 0.0220 | 294.0 | 587.8 | 735.1 | 1470 | 2940 | — | — | — | — |
| 0.0222 | 288.7 | 577.3 | 721.9 | 1443 | 2887 | — | — | — | — |
| 0.0224 | 283.6 | 567.0 | 709.1 | 1418 | 2836 | — | — | — | — |
| 0.0226 | 278.6 | 557.0 | 696.6 | 1393 | 2786 | — | — | — | — |
| 0.0228 | 273.7 | 547.3 | 684.4 | 1368 | 2737 | — | — | — | — |
| 0.0230 | 269.0 | 537.8 | 672.6 | 1345 | 2690 | — | — | — | — |
| 0.0282 | 264.4 | 528.6 | 661.0 | 1322 | 2644 | — | — | — | — |
| 0.0234 | 259.9 | 519.6 | 649.8 | 1299 | 2599 | — | — | — | — |
| 0.0236 | 255.5 | 510.8 | 638.8 | 1277 | 2555 | — | — | — | — |
| 0.0238 | 251.2 | 502.3 | 628.1 | 1256 | 2512 | — | — | — | — |
| 0.0240 | 247.0 | 493.9 | 617.7 | 1235 | 2470 | — | — | — | — |
| 0.0242 | 243.0 | 485.8 | 607.5 | 1215 | 2430 | — | — | — | — |
| 0.0244 | 239.0 | 477.9 | 597.6 | 1195 | 2390 | — | — | — | — |
| 0.0246 | 235.1 | 470.1 | 587.9 | 1176 | 2351 | — | — | — | — |
| 0.0248 | 231.4 | 462.6 | 578.5 | 1157 | 2314 | — | — | — | — |
| 0.0250 | 227.7 | 455.2 | 569.3 | 1138 | 2277 | — | — | — | — |
| 0.0252 | 224.1 | 448.0 | 560.3 | 1120 | 2241 | — | — | — | — |
| 0.0254 | 220.6 | 441.0 | 551.5 | 1103 | 2206 | — | — | — | — |
| 0.0256 | 217.1 | 434.1 | 542.9 | 1086 | 2171 | — | — | — | — |
| 0.0258 | 213.8 | 427.4 | 534.5 | 1069 | 2138 | — | — | — | — |
| 0.0260 | 210.5 | 420.9 | 526.3 | 1052 | 2105 | — | — | — | — |
| 0.0262 | 207.3 | 414.5 | 518.3 | 1036 | 2073 | — | — | — | |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0264 | 204.2 | 408.2 | 510.5 | 1021 | 2042 | — | — | — | — |
| 0.0266 | 201.1 | 402.1 | 502.9 | 1005 | 2011 | — | — | — | — |
| 0.0268 | 198.1 | 396.1 | 495.4 | 990.5 | 1981 | — | — | — | — |
| 0.0270 | 195.2 | 390.3 | 488.1 | 975.9 | 1952 | — | — | — | — |
| 0.0272 | 192.3 | 384.5 | 480.9 | 961.6 | 1923 | — | — | — | — |
| 0.0274 | 189.5 | 378.9 | 473.9 | 947.6 | 1895 | — | — | — | — |
| 0.0276 | 186.8 | 373.5 | 467.1 | 933.9 | 1868 | — | — | — | — |
| 0.0278 | 184.1 | 368.1 | 460.4 | 920.5 | 1841 | — | — | — | — |
| 0.0280 | 181.5 | 362.9 | 453.8 | 907.4 | 1815 | — | — | — | — |
| 0.0282 | 178.9 | 357.8 | 447.4 | 894.6 | 1789 | — | — | — | — |
| 0.0284 | 176.4 | 352.7 | 441.1 | 882.0 | 1764 | — | — | — | — |
| 0.0286 | 174.0 | 347.8 | 435.0 | 869.7 | 1740 | — | — | — | — |
| 0.0288 | 171.6 | 343.0 | 429.0 | 857.7 | 1716 | — | — | — | — |
| 0.0290 | 169.2 | 338.3 | 423.1 | 845.9 | 1692 | — | — | — | — |
| 0.0292 | 166.9 | 333.7 | 417.3 | 834.3 | 1669 | — | — | — | — |
| 0.0294 | 164.6 | 329.1 | 411.6 | 823.0 | 1646 | — | — | — | — |
| 0.0296 | 162.4 | 324.7 | 406.1 | 812.0 | 1624 | — | — | — | — |
| 0.0298 | 160.2 | 320.4 | 400.7 | 801.1 | 1602 | — | — | — | — |
| 0.0300 | 158.1 | 316.1 | 395.3 | 790.4 | 1581 | — | — | — | — |
| 0.0302 | 156.0 | 311.9 | 390.1 | 780.0 | 1560 | — | — | — | — |
| 0.0304 | 154.0 | 307.8 | 385.0 | 769.8 | 1540 | — | — | — | — |
| 0.0306 | 152.0 | 303.8 | 380.0 | 759.8 | 1520 | — | — | — | — |
| 0.0308 | 150.0 | 299.9 | 375.1 | 749.9 | 1500 | 2999 | — | — | — |
| 0.0310 | 148.1 | 296.0 | 370.2 | 740.3 | 1481 | 2960 | — | — | — |
| 0.0312 | 146.2 | 292.3 | 365.5 | 730.8 | 1462 | 2923 | — | — | — |
| 0.0314 | 144.3 | 288.6 | 360.9 | 721.5 | 1443 | 2886 | — | — | — |
| 0.0316 | 142.5 | 284.9 | 356.3 | 712.4 | 1425 | 2849 | — | — | — |
| 0.0318 | 140.1 | 281.3 | 351.8 | 703.5 | 1407 | 2813 | — | — | — |
| 0.0320 | 139.0 | 277.8 | 347.5 | 694.7 | 1390 | 2778 | — | — | — |
| 0.0322 | 137.2 | 274.4 | 343.2 | 686.1 | 1372 | 2744 | — | — | — |
| 0.0324 | 135.6 | 271.0 | 338.9 | 677.7 | 1356 | 2710 | — | — | — |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0326 | 133.9 | 267.7 | 334.8 | 669.4 | 1339 | 2677 | — | — | — |
| 0.0328 | 132.3 | 264.4 | 330.7 | 661.3 | 1323 | 2644 | — | — | — |
| 0.0330 | 130.7 | 261.2 | 326.7 | 653.3 | 1307 | 2612 | — | — | — |
| 0.0332 | 129.1 | 258.1 | 322.8 | 645.4 | 1291 | 2581 | — | — | — |
| 0.0334 | 127.6 | 255.0 | 318.9 | 637.7 | 1276 | 2550 | — | — | — |
| 0.0336 | 126.0 | 252.0 | 315.2 | 630.1 | 1260 | 2520 | — | — | — |
| 0.0338 | 124.6 | 249.0 | 311.4 | 622.7 | 1246 | 2490 | — | — | — |
| 0.0340 | 123.1 | 246.1 | 307.8 | 615.4 | 1231 | 2461 | — | — | — |
| 0.0342 | 121.7 | 243.2 | 304.2 | 608.2 | 1217 | 2432 | — | — | — |
| 0.0344 | 120.3 | 240.4 | 300.7 | 601.2 | 1203 | 2404 | — | — | — |
| 0.0346 | 118.9 | 237.6 | 297.2 | 594.2 | 1189 | 2376 | — | — | — |
| 0.0348 | 117.5 | 234.9 | 293.8 | 587.4 | 1175 | 2349 | — | — | — |
| 0.0350 | 116.2 | 232.2 | 290.4 | 580.7 | 1162 | 2322 | — | — | — |
| 0.0352 | 114.8 | 229.6 | 287.2 | 574.2 | 1148 | 2296 | — | — | — |
| 0.0354 | 113.0 | 227.0 | 283.9 | 567.7 | 1136 | 2270 | — | — | — |
| 0.0356 | 112.3 | 224.5 | 280.7 | 561.3 | 1123 | 2245 | — | — | — |
| 0.0358 | 111.0 | 222.0 | 277.6 | 555.1 | 1110 | 2220 | — | — | — |
| 0.0360 | 109.8 | 219.5 | 274.5 | 548.9 | 1098 | 2195 | — | — | — |
| 0.0362 | 108.6 | 217.1 | 271.5 | 542.9 | 1086 | 2171 | — | — | — |
| 0.0364 | 107.4 | 214.7 | 268.5 | 536.9 | 1074 | 2147 | — | — | — |
| 0.0366 | 106.2 | 212.4 | 265.6 | 531.1 | 1062 | 2124 | — | — | — |
| 0.0368 | 105.1 | 210.1 | 262.7 | 525.3 | 1051 | 2101 | — | — | — |
| 0.0370 | 103.9 | 207.8 | 259.9 | 519.6 | 1039 | 2078 | — | — | — |
| 0.0372 | 102.8 | 205.6 | 257.1 | 514.1 | 1028 | 2056 | — | — | — |
| 0.0374 | 101.7 | 203.4 | 254.4 | 508.6 | 1017 | 2034 | — | — | — |
| 0.0376 | 100.7 | 201.2 | 251.7 | 503.2 | 1007 | 2012 | — | — | — |
| 0.0378 | 99.59 | 199.1 | 249.0 | 497.9 | 995.9 | 1991 | 2988 | — | — |
| 0.0380 | 98.55 | 197.0 | 246.4 | 492.7 | 985.5 | 1970 | 2956 | — | — |
| 0.0382 | 97.52 | 195.0 | 243.8 | 487.5 | 975.2 | 1950 | 2925 | — | — |
| 0.0384 | 96.50 | 192.9 | 241.3 | 482.4 | 965.0 | 1929 | 2895 | — | — |
| 0.0386 | 95.51 | 190.9 | 238.8 | 477.5 | 955.1 | 1909 | 2865 | — | — |

（续）

| 压痕对角线 $d$/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0388 | 94.52 | 189.0 | 236.3 | 472.6 | 945.2 | 1890 | 2836 | — | — |
| 0.0390 | 93.56 | 187.0 | 233.9 | 467.7 | 935.6 | 1870 | 2807 | — | — |
| 0.0392 | 92.60 | 185.1 | 231.5 | 463.0 | 926.0 | 1851 | 2778 | — | — |
| 0.0394 | 91.67 | 185.3 | 229.2 | 458.3 | 916.7 | 1833 | 2750 | — | — |
| 0.0396 | 90.74 | 181.4 | 226.9 | 453.7 | 907.4 | 1814 | 2722 | — | — |
| 0.0398 | 89.83 | 179.6 | 224.6 | 449.1 | 898.3 | 1796 | 2695 | — | — |
| 0.0400 | 88.94 | 177.8 | 222.4 | 444.6 | 889.4 | 1778 | 2668 | — | — |
| 0.0402 | 88.05 | 176.0 | 220.2 | 440.2 | 880.5 | 1760 | 2642 | — | — |
| 0.0404 | 87.19 | 174.3 | 218.0 | 435.9 | 871.9 | 1743 | 2616 | — | — |
| 0.0406 | 86.33 | 172.6 | 215.9 | 431.6 | 863.3 | 1726 | 2590 | — | — |
| 0.0408 | 85.48 | 170.9 | 213.7 | 427.4 | 854.8 | 1709 | 2565 | — | — |
| 0.0410 | 84.65 | 169.2 | 211.7 | 423.2 | 846.5 | 1692 | 2540 | — | — |
| 0.0412 | 83.83 | 167.6 | 209.6 | 419.1 | 838.3 | 1676 | 2515 | — | — |
| 0.0414 | 83.02 | 166.0 | 207.6 | 415.1 | 830.2 | 1660 | 2491 | — | — |
| 0.0416 | 82.23 | 164.4 | 205.6 | 411.1 | 822.3 | 1644 | 2467 | — | — |
| 0.0418 | 81.44 | 162.8 | 203.6 | 407.2 | 814.4 | 1628 | 2443 | — | — |
| 0.0420 | 80.67 | 161.3 | 201.7 | 403.3 | 806.7 | 1613 | 2420 | — | — |
| 0.0422 | 79.91 | 159.8 | 199.8 | 399.5 | 799.1 | 1598 | 2397 | — | — |
| 0.0424 | 79.15 | 158.3 | 197.9 | 395.7 | 791.5 | 1583 | 2375 | — | — |
| 0.0426 | 78.41 | 156.8 | 196.1 | 392.0 | 784.1 | 1568 | 2352 | — | — |
| 0.0428 | 77.68 | 155.3 | 194.2 | 388.4 | 776.8 | 1553 | 2330 | — | — |
| 0.0430 | 76.96 | 153.9 | 192.4 | 384.7 | 769.6 | 1539 | 2309 | — | — |
| 0.0432 | 76.25 | 152.4 | 190.7 | 381.2 | 762.5 | 1524 | 2287 | — | — |
| 0.0434 | 75.55 | 151.0 | 188.9 | 377.7 | 755.5 | 1510 | 2266 | — | — |
| 0.0436 | 74.86 | 149.7 | 187.2 | 374.2 | 748.6 | 1497 | 2246 | — | — |
| 0.0438 | 74.17 | 148.3 | 185.5 | 370.8 | 741.7 | 1483 | 2225 | — | — |
| 0.0440 | 73.50 | 147.0 | 183.8 | 367.5 | 735.0 | 1470 | 2205 | — | — |
| 0.0442 | 72.84 | 145.6 | 182.1 | 364.1 | 728.4 | 1456 | 2185 | — | — |
| 0.0444 | 72.18 | 144.3 | 180.5 | 360.9 | 721.8 | 1443 | 2166 | — | — |
| 0.0446 | 71.54 | 143.0 | 178.9 | 357.6 | 715.4 | 1430 | 2146 | — | — |
| 0.0448 | 70.90 | 141.8 | 177.3 | 354.5 | 709.0 | 1418 | 2127 | — | — |

（续）

| 压痕对角线 $d$/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0450 | 70.27 | 140.5 | 175.7 | 351.3 | 702.7 | 1405 | 2108 | — | — |
| 0.0452 | 69.65 | 138.3 | 174.2 | 348.2 | 696.5 | 1393 | 2090 | — | — |
| 0.0454 | 69.04 | 138.0 | 172.6 | 345.1 | 690.4 | 1380 | 2071 | — | — |
| 0.0456 | 68.43 | 136.8 | 171.1 | 342.1 | 684.3 | 1368 | 2053 | — | — |
| 0.0458 | 67.84 | 135.6 | 169.6 | 339.1 | 678.4 | 1356 | 2035 | — | — |
| 0.0460 | 67.25 | 134.5 | 168.1 | 336.2 | 672.5 | 1345 | 2017 | — | — |
| 0.0462 | 66.67 | 133.3 | 166.7 | 333.3 | 666.7 | 1333 | 2000 | — | — |
| 0.0464 | 66.10 | 132.1 | 165.3 | 330.4 | 661.0 | 1321 | 1983 | — | — |
| 0.0466 | 65.53 | 131.0 | 163.8 | 327.6 | 655.3 | 1310 | 1966 | — | — |
| 0.0468 | 64.97 | 129.9 | 162.4 | 324.8 | 649.7 | 1299 | 1949 | — | — |
| 0.0470 | 64.42 | 128.8 | 161.1 | 322.0 | 644.2 | 1288 | 1933 | — | — |
| 0.0472 | 63.87 | 127.7 | 159.7 | 319.3 | 638.7 | 1277 | 1916 | — | — |
| 0.0474 | 63.34 | 126.6 | 158.4 | 316.6 | 633.4 | 1266 | 1900 | — | — |
| 0.0476 | 62.80 | 125.5 | 157.0 | 314.0 | 628.0 | 1256 | 1884 | — | — |
| 0.0478 | 62.28 | 124.5 | 155.7 | 311.4 | 622.8 | 1245 | 1868 | — | — |
| 0.0480 | 61.76 | 123.5 | 154.4 | 308.8 | 617.6 | 1235 | 1853 | — | — |
| 0.0482 | 61.25 | 122.5 | 153.1 | 306.2 | 612.5 | 1225 | 1838 | — | — |
| 0.0484 | 60.75 | 121.4 | 151.9 | 303.7 | 607.5 | 1214 | 1822 | — | — |
| 0.0486 | 60.25 | 120.5 | 150.6 | 301.2 | 602.5 | 1205 | 1807 | — | — |
| 0.0488 | 59.75 | 119.5 | 149.4 | 298.7 | 597.5 | 1195 | 1793 | 2987 | — |
| 0.0490 | 59.27 | 118.5 | 148.2 | 296.3 | 592.7 | 1185 | 1778 | 2963 | — |
| 0.0492 | 58.79 | 117.5 | 147.0 | 293.9 | 587.9 | 1175 | 1764 | 2939 | — |
| 0.0494 | 58.31 | 116.6 | 145.8 | 291.5 | 583.1 | 1166 | 1749 | 2915 | — |
| 0.0496 | 57.84 | 115.6 | 144.6 | 289.2 | 578.4 | 1156 | 1735 | 2892 | — |
| 0.0498 | 57.38 | 114.7 | 143.5 | 286.9 | 573.8 | 1147 | 1721 | 2869 | — |
| 0.0500 | 56.92 | 113.8 | 142.3 | 284.6 | 569.2 | 1138 | 1708 | 2846 | — |
| 0.0502 | 56.47 | 112.9 | 141.2 | 282.3 | 564.7 | 1129 | 1694 | 2823 | — |
| 0.0504 | 56.02 | 112.0 | 140.1 | 280.1 | 560.2 | 1120 | 1681 | 2801 | — |
| 0.0506 | 55.58 | 111.1 | 139.0 | 277.9 | 555.8 | 1111 | 1667 | 2779 | — |
| 0.0508 | 55.14 | 110.2 | 137.9 | 275.7 | 551.4 | 1102 | 1654 | 2757 | — |
| 0.0510 | 54.71 | 109.4 | 136.8 | 273.5 | 547.1 | 1094 | 1641 | 2735 | — |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0512 | 54.28 | 108.5 | 135.7 | 271.4 | 542.8 | 1085 | 1628 | 2714 | — |
| 0.0514 | 53.86 | 107.7 | 134.7 | 269.3 | 538.6 | 1077 | 1616 | 2693 | — |
| 0.0516 | 53.44 | 106.9 | 138.6 | 267.2 | 534.4 | 1069 | 1603 | 2672 | — |
| 0.0518 | 53.03 | 106.0 | 132.6 | 265.1 | 530.3 | 1060 | 1591 | 2651 | — |
| 0.0520 | 52.63 | 105.2 | 131.6 | 263.1 | 526.3 | 1052 | 1579 | 2631 | — |
| 0.0522 | 52.22 | 104.4 | 130.6 | 261.1 | 522.2 | 1044 | 1567 | 2611 | — |
| 0.0524 | 51.83 | 103.6 | 129.6 | 259.1 | 518.3 | 1036 | 1555 | 2591 | — |
| 0.0526 | 51.43 | 102.8 | 128.6 | 257.1 | 514.3 | 1028 | 1543 | 2571 | — |
| 0.0528 | 51.04 | 102.1 | 127.6 | 255.2 | 510.4 | 1021 | 1531 | 2552 | — |
| 0.0530 | 50.66 | 101.3 | 126.7 | 253.3 | 506.6 | 1013 | 1520 | 2533 | — |
| 0.0532 | 50.28 | 100.5 | 125.7 | 251.4 | 502.8 | 1005 | 1508 | 2514 | — |
| 0.0534 | 49.90 | 99.77 | 124.8 | 249.5 | 499.0 | 997.7 | 1497 | 2495 | — |
| 0.0536 | 49.53 | 99.03 | 123.8 | 247.6 | 495.3 | 990.3 | 1486 | 2476 | — |
| 0.0538 | 49.16 | 98.29 | 122.9 | 245.8 | 491.6 | 982.9 | 1475 | 2458 | — |
| 0.0540 | 48.80 | 97.57 | 122.0 | 244.0 | 488.0 | 975.7 | 1453 | 2440 | — |
| 0.0542 | 48.44 | 96.85 | 121.1 | 242.2 | 484.4 | 968.5 | 1453 | 2422 | — |
| 0.0544 | 48.08 | 96.14 | 120.2 | 240.4 | 480.8 | 961.4 | 1443 | 2404 | — |
| 0.0546 | 47.73 | 95.43 | 119.3 | 238.6 | 477.3 | 954.3 | 1432 | 2369 | — |
| 0.0548 | 47.39 | 94.74 | 118.5 | 236.9 | 473.9 | 947.4 | 1422 | 2369 | — |
| 0.0550 | 47.04 | 94.05 | 117.6 | 235.2 | 470.4 | 940.5 | 1411 | 2352 | — |
| 0.0552 | 46.70 | 93.37 | 116.8 | 233.5 | 467.0 | 933.7 | 1401 | 2335 | — |
| 0.0554 | 46.36 | 92.70 | 115.9 | 231.8 | 463.6 | 927.0 | 1391 | 2318 | — |
| 0.0556 | 46.03 | 92.03 | 115.1 | 230.1 | 460.3 | 920.3 | 1381 | 2301 | — |
| 0.0558 | 45.70 | 91.37 | 114.3 | 228.5 | 457.0 | 913.7 | 1371 | 2285 | — |
| 0.0560 | 45.38 | 90.72 | 113.5 | 226.8 | 453.8 | 907.2 | 1361 | 2268 | — |
| 0.0562 | 45.05 | 90.08 | 112.7 | 225.2 | 450.5 | 900.8 | 1352 | 2252 | — |
| 0.0564 | 44.73 | 89.44 | 111.9 | 223.6 | 447.3 | 894.4 | 1342 | 2236 | — |
| 0.0566 | 44.42 | 88.81 | 111.1 | 222.1 | 444.2 | 888.1 | 1333 | 2221 | — |
| 0.0568 | 44.11 | 88.18 | 110.3 | 220.5 | 441.1 | 881.8 | 1323 | 2205 | — |
| 0.0570 | 43.80 | 87.57 | 109.5 | 219.0 | 438.0 | 875.7 | 1314 | 2190 | — |
| 0.0572 | 43.49 | 86.95 | 108.7 | 217.4 | 434.9 | 869.5 | 1305 | 2174 | — |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0574 | 43.19 | 86.35 | 108.0 | 215.9 | 431.9 | 863.5 | 1296 | 2159 | — |
| 0.0576 | 42.89 | 85.75 | 107.2 | 214.4 | 428.9 | 857.5 | 1287 | 2144 | — |
| 0.0578 | 42.59 | 85.16 | 106.5 | 212.9 | 425.9 | 851.6 | 1278 | 2129 | — |
| 0.0580 | 42.30 | 84.57 | 105.8 | 211.5 | 423.0 | 845.7 | 1269 | 2115 | — |
| 0.0582 | 42.01 | 83.99 | 105.0 | 210.0 | 420.1 | 839.9 | 1260 | 2100 | — |
| 0.0584 | 41.72 | 83.42 | 104.3 | 208.6 | 417.2 | 834.2 | 1252 | 2086 | — |
| 0.0586 | 41.44 | 82.85 | 103.6 | 207.2 | 414.2 | 828.5 | 1243 | 2072 | — |
| 0.0588 | 41.16 | 82.29 | 102.9 | 205.8 | 411.6 | 822.9 | 1235 | 2058 | — |
| 0.0590 | 40.88 | 81.73 | 102.2 | 204.4 | 408.8 | 817.3 | 1226 | 2044 | — |
| 0.0592 | 40.60 | 81.18 | 101.5 | 203.0 | 406.0 | 811.8 | 1218 | 2030 | — |
| 0.0594 | 40.33 | 80.63 | 100.8 | 201.6 | 403.3 | 806.3 | 1210 | 2016 | — |
| 0.0596 | 40.06 | 80.09 | 100.2 | 200.3 | 400.6 | 800.9 | 1202 | 2003 | — |
| 0.0598 | 39.79 | 79.56 | 99.50 | 198.9 | 397.9 | 795.6 | 1194 | 1989 | — |
| 0.0600 | 39.53 | 79.03 | 98.83 | 197.6 | 395.3 | 790.3 | 1186 | 1976 | — |
| 0.0602 | 39.27 | 78.50 | 98.18 | 196.3 | 392.7 | 785.0 | 1178 | 1963 | — |
| 0.0604 | 39.01 | 77.98 | 97.53 | 195.0 | 390.1 | 779.8 | 1170 | 1950 | — |
| 0.0606 | 38.75 | 77.47 | 96.89 | 193.7 | 387.5 | 774.7 | 1162 | 1937 | — |
| 0.0608 | 38.49 | 76.96 | 96.25 | 192.4 | 384.9 | 769.6 | 1155 | 1924 | — |
| 0.0610 | 38.24 | 76.46 | 95.62 | 191.2 | 382.4 | 764.6 | 1147 | 1912 | — |
| 0.0612 | 37.99 | 75.96 | 95.00 | 189.9 | 379.9 | 759.6 | 1140 | 1899 | — |
| 0.0614 | 37.75 | 75.46 | 94.38 | 188.7 | 377.5 | 754.5 | 1132 | 1887 | — |
| 0.0616 | 37.50 | 74.98 | 93.77 | 187.5 | 375.0 | 749.8 | 1125 | 1875 | — |
| 0.0618 | 37.26 | 74.49 | 93.16 | 186.3 | 372.6 | 744.9 | 1118 | 1863 | — |
| 0.0620 | 37.02 | 74.01 | 92.56 | 185.1 | 370.2 | 740.1 | 1111 | 1851 | — |
| 0.0622 | 36.78 | 73.54 | 91.97 | 183.9 | 367.8 | 735.4 | 1103 | 1839 | — |
| 0.0624 | 36.55 | 73.07 | 91.38 | 182.7 | 365.5 | 730.7 | 1096 | 1827 | — |
| 0.0626 | 36.31 | 72.60 | 90.79 | 181.5 | 363.1 | 726.0 | 1089 | 1815 | — |
| 0.0628 | 36.08 | 72.14 | 90.22 | 180.4 | 360.8 | 721.4 | 1082 | 1804 | — |
| 0.0630 | 35.85 | 71.68 | 89.64 | 179.2 | 358.5 | 716.8 | 1076 | 1792 | — |
| 0.0632 | 35.63 | 71.23 | 89.08 | 178.1 | 356.3 | 712.3 | 1069 | 1781 | — |
| 0.0634 | 35.40 | 70.78 | 88.52 | 177.0 | 354.0 | 707.8 | 1062 | 1770 | — |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0636 | 35.18 | 70.33 | 87.96 | 175.9 | 351.8 | 703.3 | 1055 | 1759 | — |
| 0.0638 | 34.96 | 69.89 | 87.41 | 174.8 | 349.6 | 698.9 | 1049 | 1748 | — |
| 0.0640 | 34.74 | 69.46 | 86.87 | 173.7 | 347.4 | 694.6 | 1042 | 1737 | — |
| 0.0642 | 34.53 | 69.03 | 86.32 | 172.6 | 345.3 | 690.3 | 1036 | 1726 | — |
| 0.0644 | 34.31 | 68.60 | 85.79 | 171.5 | 343.1 | 686.0 | 1029 | 1715 | — |
| 0.0646 | 34.10 | 68.17 | 85.26 | 170.5 | 341.0 | 681.7 | 1023 | 1705 | — |
| 0.0648 | 33.89 | 67.75 | 84.73 | 169.4 | 338.9 | 677.5 | 1017 | 1694 | — |
| 0.0650 | 33.68 | 67.34 | 84.21 | 168.4 | 336.8 | 673.4 | 1010 | 1684 | — |
| 0.0652 | 33.47 | 66.92 | 83.70 | 167.3 | 334.7 | 669.2 | 1004 | 1673 | — |
| 0.0654 | 33.27 | 66.52 | 83.19 | 166.3 | 332.7 | 665.2 | 998.1 | 1663 | — |
| 0.0656 | 33.07 | 66.11 | 82.68 | 165.3 | 330.7 | 661.1 | 992.0 | 1653 | — |
| 0.0658 | 32.87 | 65.71 | 82.18 | 164.3 | 328.7 | 657.1 | 986.0 | 1643 | — |
| 0.0660 | 32.67 | 65.31 | 81.68 | 163.3 | 326.7 | 653.1 | 980.0 | 1633 | — |
| 0.0662 | 32.47 | 64.92 | 81.19 | 162.3 | 324.7 | 649.2 | 974.1 | 1623 | — |
| 0.0664 | 32.28 | 64.53 | 80.70 | 161.4 | 322.8 | 645.3 | 968.3 | 1614 | — |
| 0.0666 | 32.08 | 64.14 | 80.22 | 160.4 | 320.8 | 641.4 | 962.4 | 1604 | — |
| 0.0668 | 31.89 | 63.76 | 79.74 | 159.4 | 318.9 | 637.6 | 956.7 | 1594 | — |
| 0.0670 | 31.70 | 63.38 | 79.26 | 158.5 | 317.0 | 633.8 | 951.0 | 1585 | — |
| 0.0672 | 31.51 | 63.00 | 78.79 | 157.5 | 315.1 | 630.0 | 945.3 | 1575 | — |
| 0.0674 | 31.32 | 62.63 | 78.32 | 156.6 | 313.2 | 626.3 | 939.7 | 1566 | — |
| 0.0676 | 31.14 | 62.26 | 77.86 | 155.7 | 311.4 | 622.6 | 934.2 | 1557 | — |
| 0.0678 | 30.96 | 61.89 | 77.40 | 154.8 | 309.6 | 618.9 | 928.7 | 1548 | — |
| 0.0680 | 30.77 | 61.53 | 76.95 | 153.8 | 307.7 | 615.3 | 923.2 | 1538 | — |
| 0.0682 | 30.59 | 61.17 | 76.50 | 152.9 | 305.9 | 611.7 | 917.8 | 1529 | — |
| 0.0684 | 30.42 | 60.81 | 76.05 | 152.1 | 304.2 | 608.1 | 912.5 | 1521 | — |
| 0.0686 | 30.24 | 60.46 | 75.61 | 151.2 | 302.4 | 604.6 | 907.1 | 1512 | — |
| 0.0688 | 30.06 | 60.10 | 75.17 | 150.3 | 300.6 | 601.0 | 901.9 | 1503 | — |
| 0.0690 | 29.89 | 59.76 | 74.73 | 149.4 | 298.9 | 597.6 | 896.7 | 1494 | 2988 |
| 0.0692 | 29.72 | 59.41 | 74.30 | 148.6 | 297.2 | 594.1 | 891.5 | 1486 | 2972 |
| 0.0694 | 29.55 | 59.07 | 73.87 | 147.7 | 295.5 | 590.7 | 886.4 | 1477 | 2955 |
| 0.0696 | 29.38 | 58.73 | 73.45 | 146.9 | 293.8 | 587.3 | 881.3 | 1469 | 2938 |

（续）

| 压痕对角线 $d$/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0698 | 29.21 | 58.39 | 73.03 | 146.0 | 292.1 | 583.9 | 876.2 | 1460 | 2921 |
| 0.0700 | 29.04 | 58.06 | 72.61 | 145.2 | 290.4 | 580.6 | 871.2 | 1452 | 2904 |
| 0.0702 | 28.88 | 57.73 | 72.20 | 144.4 | 288.8 | 577.3 | 866.3 | 1444 | 2888 |
| 0.0704 | 28.71 | 57.40 | 71.79 | 143.5 | 287.1 | 574.0 | 861.4 | 1435 | 2871 |
| 0.0706 | 28.55 | 57.08 | 71.38 | 142.7 | 285.5 | 570.8 | 856.5 | 1427 | 2855 |
| 0.0708 | 28.39 | 56.76 | 70.98 | 141.9 | 283.9 | 567.6 | 851.6 | 1419 | 2839 |
| 0.0710 | 28.23 | 56.44 | 70.58 | 141.1 | 282.3 | 564.4 | 846.9 | 1411 | 2823 |
| 0.0712 | 28.07 | 56.12 | 70.19 | 140.3 | 280.7 | 561.2 | 842.1 | 1403 | 2807 |
| 0.0714 | 27.91 | 55.81 | 69.79 | 139.5 | 279.1 | 558.1 | 837.4 | 1395 | 2791 |
| 0.0716 | 27.76 | 55.50 | 69.40 | 138.8 | 277.6 | 555.0 | 832.7 | 1388 | 2776 |
| 0.0718 | 27.60 | 55.19 | 69.02 | 138.0 | 276.0 | 551.9 | 828.1 | 1380 | 2760 |
| 0.0720 | 27.45 | 54.88 | 68.63 | 137.2 | 274.5 | 548.8 | 823.5 | 1372 | 2745 |
| 0.0722 | 27.30 | 54.58 | 68.25 | 136.5 | 273.0 | 545.8 | 818.9 | 1365 | 2730 |
| 0.0724 | 27.15 | 54.28 | 67.88 | 135.7 | 271.5 | 542.8 | 814.4 | 1357 | 2715 |
| 0.0726 | 27.00 | 53.98 | 67.50 | 135.0 | 270.0 | 539.8 | 809.9 | 1350 | 2700 |
| 0.0728 | 26.85 | 53.68 | 67.13 | 134.2 | 268.5 | 536.8 | 805.5 | 1342 | 2685 |
| 0.0730 | 26.70 | 53.69 | 66.77 | 133.5 | 267.0 | 533.9 | 801.1 | 1335 | 2670 |
| 0.0732 | 26.56 | 53.10 | 66.40 | 132.8 | 265.6 | 531.0 | 796.7 | 1328 | 2656 |
| 0.0734 | 26.41 | 52.81 | 66.04 | 132.0 | 264.1 | 528.1 | 792.4 | 1320 | 2641 |
| 0.0736 | 26.27 | 52.52 | 65.68 | 131.3 | 262.7 | 525.2 | 788.1 | 1313 | 2627 |
| 0.0738 | 26.13 | 52.24 | 65.33 | 130.6 | 261.3 | 522.4 | 783.8 | 1306 | 2613 |
| 0.0740 | 25.99 | 51.95 | 64.97 | 129.9 | 259.9 | 519.5 | 779.6 | 1299 | 2599 |
| 0.0742 | 25.85 | 51.67 | 64.62 | 129.2 | 258.5 | 516.7 | 775.4 | 1292 | 2585 |
| 0.0744 | 25.71 | 51.40 | 64.28 | 128.5 | 257.1 | 514.0 | 771.2 | 1285 | 2571 |
| 0.0746 | 25.57 | 51.12 | 63.93 | 127.8 | 255.7 | 511.2 | 767.1 | 1278 | 2557 |
| 0.0748 | 25.43 | 50.85 | 63.59 | 127.1 | 254.3 | 508.5 | 763.0 | 1271 | 2543 |
| 0.0750 | 25.30 | 50.58 | 63.25 | 126.5 | 253.0 | 505.8 | 758.9 | 1265 | 2530 |
| 0.0752 | 25.16 | 50.31 | 62.92 | 125.8 | 251.6 | 503.1 | 754.9 | 1258 | 2516 |
| 0.0754 | 25.03 | 50.04 | 62.58 | 125.1 | 250.3 | 500.4 | 750.9 | 1251 | 2503 |
| 0.0756 | 24.90 | 49.78 | 62.25 | 124.5 | 249.0 | 497.8 | 746.9 | 1245 | 2490 |
| 0.0758 | 24.77 | 49.52 | 61.93 | 123.8 | 247.7 | 495.2 | 743.0 | 1238 | 2477 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0760 | 24.64 | 49.26 | 61.60 | 123.2 | 246.4 | 492.6 | 739.1 | 1232 | 2464 |
| 0.0762 | 24.51 | 49.00 | 61.28 | 122.5 | 245.1 | 490.0 | 735.2 | 1225 | 2451 |
| 0.0764 | 24.38 | 48.74 | 60.96 | 121.9 | 243.8 | 487.4 | 731.4 | 1219 | 2438 |
| 0.0766 | 24.25 | 48.49 | 60.64 | 121.2 | 242.5 | 484.9 | 727.6 | 1212 | 2425 |
| 0.0768 | 24.13 | 48.23 | 60.32 | 120.6 | 241.3 | 482.3 | 723.8 | 1206 | 2413 |
| 0.0770 | 24.00 | 47.98 | 60.01 | 120.0 | 240.0 | 479.8 | 720.0 | 1200 | 2400 |
| 0.0772 | 23.88 | 47.74 | 59.70 | 119.4 | 238.8 | 477.4 | 716.3 | 1194 | 2388 |
| 0.0774 | 23.75 | 47.49 | 59.39 | 118.7 | 237.5 | 474.9 | 712.6 | 1187 | 2375 |
| 0.0776 | 23.63 | 47.25 | 59.09 | 118.1 | 236.3 | 472.5 | 708.9 | 1181 | 2363 |
| 0.0778 | 23.51 | 47.00 | 58.78 | 117.5 | 235.1 | 470.0 | 705.3 | 1175 | 2351 |
| 0.0780 | 23.39 | 46.76 | 58.48 | 116.0 | 233.9 | 467.6 | 701.7 | 1169 | 2339 |
| 0.0782 | 23.27 | 46.52 | 58.18 | 116.3 | 232.7 | 465.2 | 698.1 | 1163 | 2327 |
| 0.0784 | 23.15 | 46.29 | 57.89 | 115.7 | 231.5 | 462.9 | 694.5 | 1157 | 2315 |
| 0.0786 | 23.03 | 46.05 | 57.59 | 115.2 | 230.3 | 460.5 | 691.0 | 1152 | 2303 |
| 0.0788 | 22.92 | 45.82 | 57.30 | 114.6 | 229.2 | 458.2 | 687.5 | 1146 | 2292 |
| 0.0790 | 22.80 | 45.59 | 57.01 | 114.0 | 228.0 | 455.9 | 684.0 | 1140 | 2280 |
| 0.0792 | 22.69 | 45.36 | 56.72 | 113.4 | 226.9 | 453.6 | 680.6 | 1134 | 2269 |
| 0.0794 | 22.57 | 45.13 | 56.44 | 112.8 | 225.7 | 451.3 | 677.2 | 1128 | 2257 |
| 0.0796 | 22.46 | 44.90 | 56.15 | 112.3 | 224.6 | 449.0 | 673.8 | 1123 | 2246 |
| 0.0798 | 22.35 | 44.68 | 55.87 | 111.7 | 223.5 | 446.8 | 670.4 | 1117 | 2235 |
| 0.0800 | 22.23 | 44.45 | 55.59 | 111.2 | 222.3 | 444.5 | 667.0 | 1112 | 2223 |
| 0.0802 | 22.12 | 44.23 | 55.32 | 110.6 | 221.2 | 442.3 | 663.7 | 1106 | 2212 |
| 0.0804 | 22.01 | 44.01 | 55.04 | 110.1 | 220.1 | 440.1 | 660.4 | 1101 | 2201 |
| 0.0806 | 21.90 | 43.79 | 54.77 | 109.5 | 219.0 | 437.9 | 657.1 | 1095 | 2190 |
| 0.0808 | 21.80 | 43.58 | 54.50 | 109.5 | 218.0 | 435.8 | 653.9 | 1090 | 2180 |
| 0.0810 | 21.69 | 43.36 | 54.23 | 108.4 | 216.9 | 433.6 | 650.7 | 1084 | 2169 |
| 0.0812 | 21.58 | 43.15 | 53.96 | 107.9 | 215.8 | 431.5 | 647.5 | 1079 | 2158 |
| 0.0814 | 21.48 | 42.94 | 53.70 | 107.4 | 214.8 | 429.4 | 644.3 | 1074 | 2148 |
| 0.0816 | 21.37 | 42.73 | 53.43 | 106.8 | 213.7 | 427.3 | 641.1 | 1068 | 2137 |
| 0.0818 | 21.27 | 42.52 | 53.17 | 106.3 | 212.7 | 425.2 | 638.0 | 1063 | 2127 |
| 0.0820 | 21.16 | 42.31 | 52.91 | 105.8 | 211.6 | 423.1 | 634.9 | 1058 | 2116 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0822 | 21.06 | 42.11 | 52.66 | 105.3 | 210.6 | 421.1 | 631.8 | 1053 | 2106 |
| 0.0824 | 20.96 | 41.90 | 52.40 | 104.8 | 209.6 | 419.0 | 628.7 | 1048 | 2096 |
| 0.0826 | 20.86 | 41.70 | 52.15 | 104.3 | 208.6 | 417.0 | 625.7 | 1043 | 2086 |
| 0.0828 | 20.78 | 41.50 | 51.90 | 103.8 | 207.6 | 415.0 | 622.7 | 1038 | 2076 |
| 0.0830 | 20.66 | 41.30 | 51.65 | 103.3 | 206.6 | 413.0 | 619.7 | 1033 | 2066 |
| 0.0832 | 20.56 | 41.10 | 51.40 | 102.8 | 205.6 | 411.0 | 616.7 | 1028 | 2056 |
| 0.0834 | 20.46 | 40.90 | 51.15 | 102.3 | 204.6 | 409.0 | 613.8 | 1023 | 2046 |
| 0.0836 | 20.36 | 40.71 | 50.91 | 101.8 | 203.6 | 407.1 | 610.8 | 1018 | 2036 |
| 0.0838 | 20.26 | 40.51 | 50.67 | 101.3 | 202.6 | 405.1 | 607.9 | 1013 | 2026 |
| 0.0840 | 20.17 | 40.32 | 50.43 | 100.8 | 201.7 | 403.2 | 605.0 | 1008 | 2017 |
| 0.0842 | 20.07 | 40.13 | 50.19 | 100.3 | 200.7 | 401.3 | 602.1 | 1003 | 2007 |
| 0.0844 | 19.98 | 39.94 | 49.95 | 99.87 | 199.8 | 399.4 | 599.3 | 998.7 | 1998 |
| 0.0846 | 19.88 | 39.75 | 49.71 | 99.40 | 198.8 | 397.5 | 596.5 | 994.0 | 1988 |
| 0.0848 | 19.79 | 39.56 | 49.48 | 98.93 | 197.9 | 395.6 | 593.7 | 989.3 | 1979 |
| 0.0850 | 19.70 | 39.38 | 49.25 | 98.46 | 197.0 | 393.8 | 590.9 | 984.6 | 1970 |
| 0.0852 | 19.60 | 39.19 | 49.01 | 98.00 | 196.0 | 391.9 | 588.1 | 980.0 | 1960 |
| 0.0854 | 19.51 | 39.01 | 48.79 | 97.54 | 195.1 | 390.1 | 585.3 | 975.4 | 1951 |
| 0.0856 | 19.42 | 38.83 | 48.56 | 97.09 | 194.2 | 388.3 | 582.6 | 970.9 | 1942 |
| 0.0858 | 19.33 | 38.65 | 48.33 | 96.64 | 193.3 | 386.5 | 579.9 | 966.4 | 1933 |
| 0.0860 | 19.24 | 38.47 | 48.11 | 96.19 | 192.4 | 384.7 | 577.2 | 961.9 | 1924 |
| 0.0862 | 19.15 | 38.29 | 47.88 | 95.74 | 191.5 | 382.9 | 574.5 | 957.4 | 1915 |
| 0.0864 | 19.06 | 38.11 | 47.66 | 95.30 | 190.6 | 381.1 | 571.9 | 953.0 | 1906 |
| 0.0866 | 18.97 | 37.94 | 47.44 | 94.86 | 189.7 | 379.4 | 569.2 | 948.6 | 1897 |
| 0.0868 | 18.89 | 37.76 | 47.22 | 94.42 | 188.9 | 377.6 | 566.6 | 944.2 | 1889 |
| 0.0870 | 18.80 | 37.59 | 47.01 | 93.99 | 188.0 | 375.9 | 564.0 | 939.9 | 1880 |
| 0.0872 | 18.71 | 37.42 | 46.79 | 93.56 | 187.1 | 374.2 | 561.4 | 935.6 | 1871 |
| 0.0874 | 18.63 | 37.24 | 46.58 | 93.13 | 186.3 | 372.4 | 558.9 | 931.3 | 1863 |
| 0.0876 | 18.54 | 37.07 | 46.37 | 92.71 | 185.4 | 370.7 | 556.3 | 927.1 | 1854 |
| 0.0878 | 18.46 | 36.91 | 46.15 | 92.38 | 184.6 | 369.1 | 553.8 | 922.8 | 1846 |
| 0.0880 | 18.38 | 36.74 | 45.95 | 91.86 | 183.8 | 367.4 | 551.3 | 918.6 | 1838 |
| 0.0882 | 18.29 | 36.57 | 45.74 | 91.45 | 182.9 | 365.7 | 548.8 | 914.5 | 1829 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0884 | 18.21 | 36.41 | 45.53 | 91.04 | 182.1 | 364.1 | 546.3 | 910.4 | 1821 |
| 0.0886 | 18.13 | 36.24 | 45.33 | 90.62 | 181.3 | 362.4 | 543.8 | 906.2 | 1813 |
| 0.0888 | 18.05 | 36.08 | 45.12 | 90.22 | 180.5 | 360.8 | 541.4 | 902.2 | 1805 |
| 0.0890 | 17.96 | 35.92 | 44.92 | 89.81 | 179.6 | 359.2 | 538.9 | 898.1 | 1796 |
| 0.0892 | 17.88 | 35.76 | 44.72 | 89.41 | 178.8 | 357.6 | 536.5 | 894.1 | 1788 |
| 0.0894 | 17.80 | 35.60 | 44.52 | 89.01 | 178.0 | 356.0 | 534.1 | 890.1 | 1780 |
| 0.0896 | 17.73 | 35.44 | 44.52 | 88.61 | 177.3 | 354.4 | 531.8 | 886.1 | 1773 |
| 0.0898 | 17.65 | 35.28 | 44.12 | 88.22 | 176.5 | 352.8 | 529.4 | 882.2 | 1765 |
| 0.0900 | 17.57 | 35.12 | 43.93 | 87.83 | 175.7 | 351.2 | 527.0 | 878.3 | 1757 |
| 0.0902 | 17.49 | 34.97 | 43.73 | 87.44 | 174.9 | 349.7 | 524.7 | 874.4 | 1749 |
| 0.0904 | 17.41 | 34.81 | 43.54 | 87.05 | 174.1 | 348.1 | 522.4 | 870.5 | 1741 |
| 0.0906 | 17.34 | 34.66 | 43.35 | 86.67 | 173.4 | 346.6 | 520.1 | 866.7 | 1734 |
| 0.0908 | 17.26 | 34.51 | 45.16 | 86.29 | 172.6 | 345.1 | 517.8 | 862.9 | 1726 |
| 0.0910 | 17.18 | 34.36 | 42.97 | 85.91 | 171.8 | 343.6 | 515.5 | 859.1 | 1718 |
| 0.0912 | 17.11 | 34.21 | 42.78 | 85.53 | 171.1 | 342.1 | 513.3 | 855.3 | 1711 |
| 0.0914 | 17.03 | 34.06 | 42.59 | 85.16 | 170.3 | 340.6 | 511.0 | 851.6 | 1703 |
| 0.0916 | 16.96 | 33.91 | 42.40 | 84.79 | 169.6 | 339.1 | 508.8 | 847.9 | 1696 |
| 0.0918 | 16.89 | 33.76 | 42.22 | 84.42 | 168.9 | 337.6 | 506.6 | 844.2 | 1689 |
| 0.0920 | 16.81 | 33.61 | 42.04 | 84.05 | 168.1 | 336.1 | 504.4 | 840.5 | 1681 |
| 0.0922 | 16.74 | 33.47 | 41.85 | 83.69 | 167.4 | 334.7 | 502.2 | 836.9 | 1674 |
| 0.0924 | 16.67 | 33.32 | 41.67 | 83.32 | 166.7 | 333.2 | 500.0 | 833.2 | 1667 |
| 0.0926 | 16.60 | 33.18 | 41.49 | 82.96 | 166.0 | 331.8 | 497.9 | 829.6 | 1660 |
| 0.0928 | 16.52 | 33.04 | 41.32 | 82.61 | 165.2 | 330.4 | 495.7 | 826.1 | 1652 |
| 0.0930 | 16.45 | 32.89 | 41.14 | 82.25 | 164.5 | 328.9 | 493.6 | 822.5 | 1645 |
| 0.0932 | 16.38 | 32.75 | 40.96 | 81.90 | 163.8 | 327.5 | 491.5 | 819.0 | 1638 |
| 0.0934 | 16.31 | 32.61 | 40.79 | 81.55 | 163.1 | 326.1 | 489.4 | 815.5 | 1631 |
| 0.0936 | 16.24 | 32.47 | 40.61 | 81.20 | 162.4 | 324.7 | 487.3 | 812.0 | 1624 |
| 0.0938 | 16.17 | 32.34 | 40.44 | 80.86 | 161.7 | 323.4 | 485.2 | 808.6 | 1617 |
| 0.0940 | 16.10 | 32.20 | 40.27 | 80.51 | 161.0 | 322.0 | 483.1 | 805.1 | 1610 |
| 0.0942 | 16.04 | 32.06 | 40.10 | 80.17 | 160.4 | 320.6 | 481.1 | 801.7 | 1604 |
| 0.0944 | 15.97 | 31.93 | 39.93 | 79.83 | 159.7 | 319.3 | 479.1 | 798.3 | 1597 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.0946 | 15.90 | 31.79 | 39.76 | 79.49 | 159.0 | 317.9 | 477.0 | 794.9 | 1590 |
| 0.0948 | 15.83 | 31.66 | 39.59 | 79.16 | 158.3 | 316.6 | 475.0 | 791.6 | 1583 |
| 0.0950 | 15.77 | 31.52 | 39.42 | 78.83 | 157.7 | 315.2 | 473.0 | 788.3 | 1577 |
| 0.0952 | 15.70 | 31.39 | 39.26 | 78.49 | 157.0 | 313.9 | 471.0 | 784.9 | 1570 |
| 0.0954 | 15.64 | 31.26 | 39.09 | 78.17 | 156.4 | 312.6 | 469.1 | 781.7 | 1564 |
| 0.0956 | 15.57 | 31.13 | 38.93 | 77.84 | 155.7 | 311.3 | 467.1 | 778.4 | 1557 |
| 0.0958 | 15.51 | 31.00 | 38.77 | 77.51 | 155.1 | 310.0 | 465.2 | 775.1 | 1551 |
| 0.0960 | 15.44 | 30.87 | 38.61 | 77.19 | 154.4 | 308.7 | 463.2 | 771.9 | 1544 |
| 0.0962 | 15.38 | 30.74 | 38.45 | 76.87 | 153.8 | 307.4 | 461.3 | 768.7 | 1538 |
| 0.0964 | 15.31 | 30.61 | 38.29 | 76.55 | 153.1 | 306.1 | 459.4 | 765.5 | 1531 |
| 0.0966 | 15.25 | 30.49 | 38.13 | 76.24 | 152.5 | 304.9 | 457.5 | 762.4 | 1525 |
| 0.0968 | 15.19 | 30.36 | 37.97 | 75.92 | 151.9 | 303.6 | 455.6 | 759.2 | 1519 |
| 0.0970 | 15.12 | 30.24 | 37.81 | 75.61 | 151.2 | 302.4 | 453.7 | 756.1 | 1512 |
| 0.0972 | 15.06 | 30.11 | 37.66 | 75.30 | 150.6 | 301.1 | 451.8 | 753.0 | 1506 |
| 0.0974 | 15.00 | 29.99 | 37.50 | 74.99 | 150.0 | 299.9 | 450.0 | 749.9 | 1500 |
| 0.0976 | 14.94 | 29.87 | 37.35 | 74.68 | 149.4 | 298.7 | 448.2 | 746.8 | 1494 |
| 0.0978 | 14.88 | 29.74 | 37.20 | 74.38 | 148.8 | 297.4 | 446.3 | 743.8 | 1488 |
| 0.0980 | 14.82 | 29.62 | 37.05 | 74.07 | 148.2 | 296.2 | 444.5 | 740.7 | 1482 |
| 0.0982 | 14.76 | 29.50 | 36.90 | 73.77 | 147.6 | 295.0 | 442.7 | 737.7 | 1476 |
| 0.0984 | 14.70 | 29.38 | 36.75 | 73.47 | 147.0 | 293.8 | 440.9 | 734.7 | 1470 |
| 0.0986 | 14.64 | 29.26 | 36.60 | 73.17 | 146.4 | 292.6 | 439.1 | 731.7 | 1464 |
| 0.0988 | 14.58 | 29.15 | 36.45 | 72.88 | 145.8 | 291.5 | 437.3 | 728.8 | 1458 |
| 0.0990 | 14.52 | 29.03 | 36.30 | 72.58 | 145.2 | 290.3 | 435.6 | 725.8 | 1452 |
| 0.0992 | 14.46 | 28.91 | 36.16 | 72.29 | 144.6 | 289.1 | 433.8 | 722.9 | 1446 |
| 0.0994 | 14.40 | 28.79 | 36.01 | 72.00 | 144.0 | 287.9 | 432.1 | 720.0 | 1440 |
| 0.0996 | 14.34 | 28.68 | 35.87 | 71.71 | 143.4 | 286.8 | 430.3 | 717.1 | 1434 |
| 0.0998 | 14.29 | 28.56 | 35.72 | 71.43 | 142.9 | 285.6 | 428.6 | 714.3 | 1429 |
| 0.1000 | 14.23 | 28.45 | 35.58 | 71.14 | 142.3 | 284.5 | 426.9 | 711.4 | 1423 |
| 0.1002 | 14.17 | 28.34 | 35.44 | 70.86 | 141.7 | 283.4 | 425.2 | 708.6 | 1417 |
| 0.1004 | 14.12 | 28.22 | 35.30 | 70.57 | 141.2 | 282.2 | 423.5 | 705.7 | 1412 |
| 0.1006 | 14.06 | 28.11 | 35.16 | 70.29 | 140.6 | 281.1 | 421.8 | 702.9 | 1406 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1008 | 14.01 | 28.00 | 35.02 | 72.02 | 140.1 | 280.0 | 420.2 | 700.2 | 1401 |
| 0.1010 | 13.95 | 27.89 | 34.88 | 69.74 | 139.5 | 278.9 | 418.5 | 697.4 | 1395 |
| 0.1012 | 13.89 | 27.78 | 34.74 | 69.46 | 138.9 | 277.8 | 416.8 | 694.6 | 1389 |
| 0.1014 | 13.84 | 27.67 | 34.60 | 69.19 | 138.4 | 276.7 | 415.2 | 691.9 | 1384 |
| 0.1016 | 13.79 | 27.56 | 34.74 | 68.92 | 137.9 | 275.6 | 413.6 | 689.2 | 1379 |
| 0.1018 | 13.73 | 27.45 | 34.33 | 68.85 | 137.3 | 274.5 | 411.9 | 686.5 | 1373 |
| 0.1020 | 13.68 | 27.35 | 34.20 | 68.38 | 136.8 | 273.5 | 410.3 | 683.8 | 1368 |
| 0.1022 | 13.62 | 27.24 | 34.06 | 68.11 | 136.2 | 272.4 | 408.7 | 681.1 | 1362 |
| 0.1024 | 13.57 | 27.13 | 33.93 | 67.84 | 135.7 | 271.3 | 407.1 | 678.4 | 1357 |
| 0.1026 | 13.52 | 27.03 | 33.80 | 67.58 | 135.2 | 270.3 | 405.5 | 675.8 | 1352 |
| 0.1028 | 13.47 | 26.92 | 33.67 | 67.32 | 134.7 | 269.2 | 404.0 | 673.2 | 1347 |
| 0.1030 | 13.41 | 26.82 | 33.54 | 67.06 | 134.1 | 268.2 | 402.4 | 670.6 | 1341 |
| 0.1032 | 13.36 | 26.71 | 33.41 | 66.80 | 133.6 | 267.1 | 400.8 | 668.0 | 1336 |
| 0.1034 | 13.31 | 26.61 | 33.28 | 66.54 | 133.1 | 266.1 | 399.3 | 665.4 | 1331 |
| 0.1036 | 13.26 | 26.51 | 33.15 | 66.28 | 132.6 | 265.1 | 397.7 | 662.8 | 1326 |
| 0.1038 | 13.21 | 26.41 | 33.02 | 66.03 | 132.1 | 264.1 | 396.2 | 660.3 | 1321 |
| 0.1040 | 13.16 | 26.30 | 32.90 | 65.77 | 131.6 | 263.0 | 394.7 | 657.7 | 1316 |
| 0.1042 | 13.11 | 26.20 | 32.77 | 65.52 | 131.1 | 262.0 | 393.2 | 655.2 | 1311 |
| 0.1044 | 13.06 | 26.10 | 32.64 | 65.27 | 130.6 | 261.0 | 391.7 | 652.7 | 1306 |
| 0.1046 | 13.01 | 26.00 | 32.52 | 65.02 | 130.1 | 260.0 | 390.2 | 650.2 | 1301 |
| 0.1048 | 12.96 | 25.90 | 32.40 | 64.77 | 129.6 | 259.0 | 388.7 | 647.7 | 1296 |
| 0.1050 | 12.91 | 25.80 | 32.27 | 64.53 | 129.1 | 258.0 | 387.2 | 645.3 | 1291 |
| 0.1052 | 12.86 | 25.71 | 32.15 | 64.28 | 128.6 | 257.1 | 385.7 | 642.8 | 1286 |
| 0.1054 | 12.81 | 25.61 | 32.03 | 64.04 | 128.1 | 256.1 | 384.3 | 640.4 | 1281 |
| 0.1056 | 12.76 | 25.51 | 31.91 | 63.79 | 127.6 | 255.1 | 382.8 | 637.9 | 1276 |
| 0.1058 | 12.71 | 25.42 | 31.79 | 63.55 | 127.1 | 254.2 | 381.4 | 635.5 | 1271 |
| 0.1060 | 12.66 | 25.32 | 31.67 | 63.31 | 126.6 | 253.2 | 379.9 | 633.1 | 1266 |
| 0.1062 | 12.62 | 25.23 | 31.55 | 63.08 | 126.2 | 252.3 | 378.5 | 630.8 | 1262 |
| 0.1064 | 12.57 | 25.13 | 31.43 | 62.84 | 125.7 | 251.3 | 377.1 | 628.4 | 1257 |
| 0.1066 | 12.52 | 25.04 | 31.31 | 62.60 | 125.2 | 250.4 | 375.7 | 626.0 | 1252 |
| 0.1068 | 12.48 | 24.94 | 31.19 | 62.37 | 124.8 | 249.4 | 374.3 | 623.7 | 1248 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1070 | 12.43 | 24.85 | 31.08 | 62.14 | 124.3 | 248.5 | 372.9 | 621.4 | 1243 |
| 0.1072 | 12.38 | 24.76 | 30.96 | 61.90 | 123.8 | 247.5 | 371.5 | 619.0 | 1238 |
| 0.1074 | 12.34 | 24.66 | 30.85 | 61.67 | 123.4 | 246.6 | 370.1 | 616.7 | 1234 |
| 0.1076 | 12.29 | 24.57 | 30.73 | 61.45 | 122.9 | 245.7 | 368.7 | 614.5 | 1229 |
| 0.1078 | 12.25 | 24.48 | 30.62 | 61.22 | 122.5 | 244.8 | 367.4 | 612.2 | 1225 |
| 0.1080 | 12.20 | 24.39 | 30.50 | 60.99 | 122.0 | 243.9 | 366.0 | 609.9 | 1220 |
| 0.1082 | 12.15 | 24.30 | 30.39 | 60.77 | 121.5 | 243.0 | 364.6 | 607.7 | 1215 |
| 0.1084 | 12.11 | 24.21 | 30.28 | 60.54 | 121.1 | 242.1 | 363.3 | 605.4 | 1211 |
| 0.1086 | 12.07 | 24.12 | 30.17 | 60.32 | 120.7 | 241.2 | 362.0 | 603.2 | 1207 |
| 0.1088 | 12.02 | 24.03 | 30.06 | 60.10 | 120.2 | 240.3 | 360.6 | 601.0 | 1202 |
| 0.1090 | 11.98 | 23.95 | 29.95 | 59.88 | 119.8 | 239.5 | 359.3 | 598.8 | 1198 |
| 0.1092 | 11.93 | 23.86 | 29.84 | 59.66 | 119.3 | 238.6 | 358.0 | 596.6 | 1193 |
| 0.1094 | 11.89 | 23.77 | 29.73 | 59.44 | 118.9 | 237.7 | 356.7 | 594.4 | 1189 |
| 0.1096 | 11.85 | 23.68 | 29.62 | 59.22 | 118.5 | 236.8 | 355.4 | 592.2 | 1185 |
| 0.1098 | 11.80 | 23.60 | 29.51 | 59.01 | 118.0 | 236.0 | 354.1 | 590.1 | 1180 |
| 0.1100 | 11.76 | 23.51 | 29.40 | 58.79 | 117.6 | 235.1 | 352.8 | 587.9 | 1176 |
| 0.1102 | 11.72 | 23.43 | 29.30 | 58.58 | 117.2 | 234.3 | 351.5 | 585.8 | 1172 |
| 0.1104 | 11.68 | 23.34 | 29.19 | 58.37 | 116.8 | 233.4 | 350.3 | 583.7 | 1168 |
| 0.1106 | 11.63 | 23.26 | 29.09 | 58.16 | 116.3 | 232.6 | 349.0 | 581.6 | 1163 |
| 0.1108 | 11.59 | 23.17 | 28.98 | 57.95 | 115.9 | 231.7 | 347.7 | 579.5 | 1159 |
| 0.1110 | 11.55 | 23.09 | 28.88 | 57.74 | 115.5 | 230.9 | 346.5 | 577.4 | 1155 |
| 0.1112 | 11.51 | 23.01 | 28.77 | 57.53 | 115.1 | 230.1 | 345.2 | 575.3 | 1151 |
| 0.1114 | 11.47 | 22.93 | 28.67 | 57.32 | 114.7 | 229.5 | 344.0 | 573.2 | 1147 |
| 0.1116 | 11.43 | 22.84 | 28.57 | 57.12 | 114.3 | 228.4 | 342.8 | 571.2 | 1143 |
| 0.1118 | 11.38 | 22.76 | 28.47 | 56.92 | 113.8 | 227.6 | 341.5 | 569.2 | 1138 |
| 0.1120 | 11.34 | 22.68 | 28.36 | 56.71 | 113.4 | 226.8 | 340.3 | 567.1 | 1134 |
| 0.1122 | 11.30 | 22.60 | 28.26 | 56.51 | 113.0 | 226.0 | 339.1 | 565.1 | 1130 |
| 0.1124 | 11.26 | 22.52 | 28.16 | 56.31 | 112.6 | 225.2 | 337.9 | 563.1 | 1126 |
| 0.1126 | 11.22 | 22.44 | 28.06 | 56.11 | 112.2 | 224.4 | 336.7 | 561.1 | 1122 |
| 0.1128 | 11.18 | 22.36 | 27.96 | 55.91 | 111.8 | 223.6 | 335.5 | 559.1 | 1118 |
| 0.1130 | 11.14 | 22.28 | 27.86 | 55.71 | 111.4 | 222.8 | 334.3 | 557.1 | 1114 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1132 | 11.10 | 22.20 | 27.77 | 55.52 | 111.0 | 222.0 | 333.1 | 555.2 | 1110 |
| 0.1134 | 11.07 | 22.12 | 27.67 | 55.32 | 110.7 | 221.2 | 332.0 | 553.2 | 1107 |
| 0.1136 | 11.03 | 22.05 | 27.57 | 55.13 | 110.3 | 220.5 | 330.8 | 551.3 | 1103 |
| 0.1138 | 10.99 | 21.97 | 27.47 | 54.93 | 109.9 | 219.7 | 329.6 | 549.3 | 1099 |
| 0.1140 | 10.95 | 21.89 | 27.38 | 54.74 | 109.5 | 218.9 | 328.5 | 547.4 | 1095 |
| 0.1142 | 10.91 | 21.81 | 27.28 | 54.55 | 109.1 | 218.1 | 327.3 | 545.5 | 1091 |
| 0.1144 | 10.87 | 21.74 | 27.19 | 54.36 | 108.7 | 217.4 | 326.2 | 543.6 | 1087 |
| 0.1146 | 10.84 | 21.66 | 27.09 | 54.17 | 108.4 | 216.6 | 325.1 | 541.7 | 1084 |
| 0.1148 | 10.80 | 21.59 | 27.00 | 53.98 | 108.0 | 215.9 | 323.9 | 539.8 | 1080 |
| 0.1150 | 10.76 | 21.51 | 26.90 | 53.79 | 107.6 | 215.1 | 322.8 | 537.9 | 1076 |
| 0.1152 | 10.72 | 21.44 | 26.81 | 53.61 | 107.2 | 214.4 | 321.7 | 536.1 | 1072 |
| 0.1154 | 10.69 | 21.36 | 26.72 | 53.42 | 106.9 | 213.6 | 320.6 | 534.2 | 1069 |
| 0.1156 | 10.65 | 21.29 | 26.63 | 53.24 | 106.5 | 212.9 | 319.5 | 532.4 | 1065 |
| 0.1158 | 10.61 | 21.22 | 26.53 | 53.05 | 106.1 | 212.2 | 318.4 | 530.5 | 1061 |
| 0.1160 | 10.58 | 21.14 | 26.44 | 52.87 | 105.8 | 211.4 | 317.3 | 528.7 | 1058 |
| 0.1162 | 10.54 | 21.07 | 26.35 | 52.69 | 105.4 | 210.7 | 316.2 | 526.9 | 1054 |
| 0.1164 | 10.50 | 21.00 | 26.26 | 52.51 | 105.0 | 210.0 | 315.1 | 525.1 | 1050 |
| 0.1166 | 10.47 | 20.93 | 26.17 | 52.33 | 104.7 | 209.3 | 314.0 | 523.5 | 1047 |
| 0.1168 | 10.43 | 20.85 | 26.08 | 52.15 | 104.3 | 208.5 | 312.9 | 521.3 | 1043 |
| 0.1170 | 10.40 | 20.78 | 25.99 | 51.97 | 104.0 | 207.8 | 311.9 | 519.7 | 1040 |
| 0.1172 | 10.36 | 20.71 | 25.90 | 51.79 | 103.6 | 207.1 | 310.8 | 517.9 | 1036 |
| 0.1174 | 10.32 | 20.64 | 25.81 | 51.62 | 103.2 | 206.4 | 309.7 | 516.2 | 1032 |
| 0.1176 | 10.29 | 20.57 | 25.73 | 51.44 | 102.9 | 205.7 | 308.7 | 514.4 | 1029 |
| 0.1178 | 10.25 | 20.50 | 25.64 | 51.27 | 102.5 | 205.0 | 307.6 | 512.7 | 1025 |
| 0.1180 | 10.22 | 20.43 | 25.55 | 51.09 | 102.2 | 204.3 | 306.6 | 510.9 | 1022 |
| 0.1182 | 10.19 | 20.36 | 25.47 | 50.92 | 101.9 | 203.6 | 305.6 | 509.2 | 1019 |
| 0.1184 | 10.15 | 20.29 | 25.38 | 50.75 | 101.5 | 202.9 | 304.5 | 507.5 | 1015 |
| 0.1186 | 10.12 | 20.23 | 25.30 | 50.58 | 101.2 | 202.3 | 303.5 | 505.8 | 1012 |
| 0.1188 | 10.08 | 20.16 | 25.21 | 50.41 | 100.8 | 201.6 | 302.5 | 504.1 | 1008 |
| 0.1190 | 10.05 | 20.09 | 25.13 | 50.24 | 100.5 | 200.9 | 301.5 | 502.4 | 1005 |
| 0.1192 | 10.02 | 20.02 | 25.04 | 50.07 | 100.2 | 200.2 | 300.5 | 500.7 | 1002 |
| 0.1194 | 9.98 | 19.96 | 24.96 | 49.90 | 99.82 | 199.6 | 299.4 | 499.0 | 998.2 |
| 0.1196 | 9.95 | 19.89 | 24.87 | 49.73 | 99.48 | 198.9 | 298.4 | 497.3 | 994.8 |
| 0.1198 | 9.91 | 19.82 | 24.79 | 49.57 | 99.15 | 198.2 | 297.4 | 495.7 | 991.5 |
| 0.1200 | 9.88 | 19.76 | 24.71 | 49.40 | 98.82 | 197.6 | 296.5 | 494.0 | 988.2 |
| 0.1202 | 9.85 | 19.69 | 24.63 | 49.24 | 98.49 | 196.9 | 295.5 | 492.4 | 984.9 |
| 0.1204 | 9.82 | 19.63 | 24.54 | 49.08 | 98.16 | 196.3 | 294.5 | 490.8 | 981.6 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1206 | 9.78 | 19.56 | 24.46 | 48.91 | 97.84 | 195.6 | 293.5 | 489.1 | 978.4 |
| 0.1208 | 9.75 | 19.50 | 24.38 | 48.75 | 97.51 | 195.0 | 292.5 | 487.5 | 975.1 |
| 0.1210 | 9.72 | 19.43 | 24.30 | 48.59 | 97.19 | 194.3 | 291.6 | 485.9 | 971.9 |
| 0.1212 | 9.69 | 19.37 | 24.22 | 48.43 | 96.87 | 193.7 | 290.6 | 484.3 | 968.7 |
| 0.1214 | 9.66 | 19.30 | 24.14 | 48.27 | 96.55 | 193.0 | 289.7 | 482.7 | 965.5 |
| 0.1216 | 9.62 | 19.24 | 24.06 | 48.11 | 96.24 | 192.4 | 288.7 | 481.1 | 962.4 |
| 0.1218 | 9.59 | 19.18 | 23.98 | 47.95 | 95.92 | 191.8 | 287.8 | 479.5 | 959.2 |
| 0.1220 | 9.56 | 19.11 | 23.90 | 47.80 | 95.61 | 191.1 | 286.8 | 478.0 | 956.1 |
| 0.1222 | 9.53 | 19.05 | 23.83 | 47.64 | 95.29 | 190.5 | 285.9 | 476.4 | 952.9 |
| 0.1224 | 9.50 | 18.99 | 23.75 | 47.48 | 94.98 | 189.9 | 284.9 | 474.8 | 949.8 |
| 0.1226 | 9.47 | 18.93 | 23.67 | 47.33 | 94.67 | 189.3 | 284.0 | 473.3 | 946.7 |
| 0.1228 | 9.44 | 18.87 | 23.59 | 47.18 | 94.36 | 188.7 | 283.1 | 471.8 | 943.6 |
| 0.1230 | 9.41 | 18.80 | 23.52 | 47.02 | 94.06 | 188.0 | 282.2 | 470.2 | 940.6 |
| 0.1232 | 9.38 | 18.74 | 23.44 | 46.87 | 93.75 | 187.4 | 281.3 | 468.7 | 937.5 |
| 0.1234 | 9.34 | 18.68 | 23.37 | 46.72 | 93.45 | 186.8 | 280.3 | 467.2 | 934.5 |
| 0.1236 | 9.31 | 18.62 | 23.29 | 46.57 | 93.15 | 186.2 | 279.4 | 465.7 | 931.5 |
| 0.1238 | 9.28 | 18.56 | 23.21 | 46.42 | 92.85 | 185.6 | 278.5 | 464.2 | 928.5 |
| 0.1240 | 9.25 | 18.50 | 23.14 | 46.27 | 92.55 | 185.0 | 277.6 | 462.7 | 925.5 |
| 0.1242 | 9.22 | 18.44 | 23.07 | 46.12 | 92.25 | 184.4 | 276.7 | 461.2 | 922.5 |
| 0.1244 | 9.20 | 18.38 | 22.99 | 45.97 | 91.95 | 183.8 | 275.9 | 459.7 | 919.5 |
| 0.1246 | 9.17 | 18.33 | 22.92 | 45.82 | 91.66 | 183.3 | 275.0 | 458.2 | 916.6 |
| 0.1248 | 9.14 | 18.27 | 22.84 | 45.68 | 91.36 | 182.7 | 274.1 | 456.8 | 913.6 |
| 0.1250 | 9.11 | 18.21 | 22.77 | 45.53 | 91.07 | 182.1 | 273.2 | 455.3 | 910.7 |
| 0.1252 | 9.08 | 18.15 | 22.70 | 45.38 | 90.78 | 181.5 | 272.3 | 453.8 | 907.8 |
| 0.1254 | 9.05 | 18.09 | 22.63 | 45.24 | 90.49 | 180.9 | 271.5 | 452.4 | 904.9 |
| 0.1256 | 9.02 | 18.03 | 22.55 | 45.10 | 90.20 | 180.3 | 270.6 | 451.0 | 902.0 |
| 0.1258 | 8.99 | 17.98 | 22.48 | 44.95 | 89.92 | 179.8 | 269.8 | 449.5 | 899.2 |
| 0.1260 | 8.96 | 17.92 | 22.41 | 44.81 | 89.63 | 179.2 | 268.9 | 448.1 | 896.3 |
| 0.1262 | 8.93 | 17.86 | 22.34 | 44.67 | 89.35 | 178.6 | 268.0 | 446.7 | 893.5 |
| 0.1264 | 8.91 | 17.81 | 22.27 | 44.53 | 89.07 | 178.1 | 267.2 | 445.3 | 890.7 |
| 0.1266 | 8.88 | 17.75 | 22.20 | 44.39 | 88.78 | 177.5 | 266.4 | 443.9 | 887.8 |
| 0.1268 | 8.85 | 17.69 | 22.13 | 44.25 | 88.50 | 176.9 | 265.5 | 442.5 | 885.0 |
| 0.1270 | 8.82 | 17.64 | 22.06 | 44.11 | 88.23 | 176.4 | 264.7 | 441.1 | 882.3 |
| 0.1272 | 8.79 | 17.58 | 21.99 | 43.97 | 87.95 | 175.8 | 263.8 | 439.7 | 879.5 |
| 0.1274 | 8.77 | 17.53 | 21.92 | 43.83 | 87.67 | 175.3 | 263.0 | 438.3 | 876.7 |
| 0.1276 | 8.74 | 17.47 | 21.85 | 43.69 | 87.40 | 174.7 | 262.2 | 436.9 | 874.0 |
| 0.1278 | 8.71 | 17.42 | 21.78 | 43.56 | 87.13 | 174.2 | 261.4 | 435.6 | 871.3 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1280 | 8.69 | 17.36 | 21.72 | 43.42 | 86.85 | 173.6 | 260.6 | 434.2 | 868.5 |
| 0.1282 | 8.66 | 17.31 | 21.65 | 43.29 | 86.58 | 173.1 | 259.7 | 432.9 | 865.8 |
| 0.1284 | 8.63 | 17.26 | 21.58 | 43.15 | 86.31 | 172.6 | 258.9 | 431.5 | 863.1 |
| 0.1286 | 8.60 | 17.20 | 21.51 | 43.02 | 86.04 | 172.0 | 258.1 | 430.2 | 860.4 |
| 0.1288 | 8.58 | 17.15 | 21.45 | 42.88 | 85.78 | 171.5 | 257.3 | 428.8 | 857.8 |
| 0.1290 | 8.55 | 17.10 | 21.38 | 42.75 | 85.51 | 171.0 | 256.5 | 427.5 | 855.1 |
| 0.1292 | 8.52 | 17.04 | 21.31 | 42.62 | 85.25 | 170.4 | 255.7 | 426.2 | 852.5 |
| 0.1294 | 8.50 | 16.99 | 21.25 | 42.49 | 84.98 | 169.9 | 255.0 | 424.9 | 849.8 |
| 0.1296 | 8.47 | 16.94 | 21.18 | 42.35 | 84.72 | 169.4 | 254.2 | 423.5 | 847.2 |
| 0.1298 | 8.42 | 16.89 | 21.12 | 42.22 | 84.46 | 168.9 | 253.4 | 422.2 | 844.6 |
| 0.1300 | 8.39 | 16.83 | 21.05 | 42.09 | 84.20 | 168.3 | 252.6 | 420.9 | 842.0 |
| 0.1302 | 8.37 | 16.78 | 20.99 | 41.97 | 83.94 | 167.8 | 251.8 | 419.7 | 839.4 |
| 0.1304 | 8.37 | 16.73 | 20.92 | 41.84 | 83.69 | 167.3 | 251.1 | 418.4 | 836.9 |
| 0.1306 | 8.34 | 16.68 | 20.86 | 41.71 | 83.43 | 166.8 | 250.3 | 417.1 | 834.3 |
| 0.1308 | 8.32 | 16.63 | 20.80 | 41.58 | 83.17 | 166.3 | 249.5 | 415.8 | 831.7 |
| 0.1310 | 8.29 | 16.58 | 20.73 | 41.45 | 82.92 | 165.8 | 248.8 | 414.5 | 829.2 |
| 0.1312 | 8.27 | 16.53 | 20.67 | 41.33 | 82.67 | 165.3 | 248.0 | 413.3 | 826.7 |
| 0.1314 | 8.24 | 16.48 | 20.61 | 41.20 | 82.42 | 164.8 | 247.2 | 412.0 | 824.2 |
| 0.1316 | 8.22 | 16.43 | 20.54 | 41.08 | 82.17 | 164.3 | 246.5 | 410.8 | 821.7 |
| 0.1318 | 8.19 | 16.38 | 20.48 | 40.95 | 81.92 | 163.8 | 245.8 | 409.5 | 819.2 |
| 0.1320 | 8.17 | 16.33 | 20.42 | 40.83 | 81.67 | 163.3 | 245.0 | 408.3 | 816.7 |
| 0.1322 | 8.14 | 16.28 | 20.36 | 40.71 | 81.42 | 162.8 | 244.3 | 407.1 | 814.2 |
| 0.1324 | 8.12 | 16.23 | 20.30 | 40.58 | 81.18 | 162.3 | 243.5 | 405.8 | 811.8 |
| 0.1326 | 8.09 | 16.18 | 20.24 | 40.46 | 80.93 | 161.8 | 242.8 | 404.6 | 809.3 |
| 0.1328 | 8.07 | 16.13 | 20.17 | 40.34 | 80.69 | 161.3 | 242.1 | 403.4 | 806.9 |
| 0.1330 | 8.04 | 16.08 | 20.11 | 40.22 | 80.45 | 160.8 | 241.3 | 402.2 | 804.5 |
| 0.1332 | 8.02 | 16.04 | 20.05 | 40.10 | 80.20 | 160.4 | 240.6 | 401.0 | 802.0 |
| 0.1334 | 8.00 | 15.99 | 19.99 | 39.98 | 79.96 | 159.9 | 239.9 | 399.8 | 799.6 |
| 0.1336 | 7.97 | 15.94 | 19.93 | 39.86 | 79.72 | 159.4 | 239.2 | 398.6 | 797.2 |
| 0.1338 | 7.95 | 15.89 | 19.87 | 39.74 | 79.49 | 158.9 | 238.5 | 397.4 | 794.9 |
| 0.1340 | 7.92 | 15.84 | 19.82 | 39.62 | 79.25 | 158.4 | 237.7 | 396.2 | 792.5 |
| 0.1342 | 7.90 | 15.80 | 19.76 | 39.50 | 79.01 | 158.0 | 237.0 | 395.0 | 790.1 |
| 0.1344 | 7.88 | 15.75 | 19.70 | 39.38 | 78.78 | 157.5 | 236.3 | 393.8 | 787.8 |
| 0.1346 | 7.85 | 15.70 | 19.64 | 39.27 | 78.54 | 157.0 | 235.6 | 392.7 | 785.4 |
| 0.1348 | 7.83 | 15.66 | 19.58 | 39.15 | 78.31 | 156.6 | 234.9 | 391.5 | 783.1 |
| 0.1350 | 7.81 | 15.61 | 19.52 | 39.03 | 78.08 | 156.1 | 234.2 | 390.3 | 780.8 |
| 0.1352 | 7.78 | 15.56 | 19.46 | 38.92 | 77.85 | 155.6 | 233.5 | 389.2 | 778.5 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1354 | 7.76 | 15.52 | 19.41 | 38.80 | 77.62 | 155.2 | 232.9 | 388.0 | 776.2 |
| 0.1356 | 7.74 | 15.47 | 19.35 | 38.69 | 77.39 | 154.7 | 232.2 | 386.9 | 773.9 |
| 0.1358 | 7.72 | 15.43 | 19.29 | 38.58 | 77.16 | 154.3 | 231.5 | 385.8 | 771.6 |
| 0.1360 | 7.69 | 15.38 | 19.24 | 38.46 | 76.94 | 153.8 | 230.8 | 384.6 | 769.4 |
| 0.1362 | 7.67 | 15.34 | 19.18 | 38.35 | 76.71 | 153.4 | 230.1 | 383.5 | 767.1 |
| 0.1364 | 7.65 | 15.29 | 19.12 | 38.24 | 76.48 | 152.9 | 229.5 | 382.4 | 764.8 |
| 0.1366 | 7.63 | 15.25 | 19.07 | 38.13 | 76.26 | 152.5 | 228.8 | 381.3 | 762.6 |
| 0.1368 | 7.60 | 15.20 | 19.01 | 38.01 | 76.04 | 152.0 | 228.1 | 380.1 | 760.4 |
| 0.1370 | 7.58 | 15.16 | 18.96 | 37.90 | 75.82 | 151.6 | 227.4 | 379.0 | 758.2 |
| 0.1372 | 7.56 | 15.11 | 18.90 | 37.79 | 75.60 | 151.1 | 226.8 | 377.9 | 756.0 |
| 0.1374 | 7.54 | 15.07 | 18.85 | 37.68 | 75.38 | 150.7 | 226.1 | 376.8 | 753.8 |
| 0.1376 | 7.52 | 15.03 | 18.79 | 37.57 | 75.16 | 150.3 | 225.5 | 375.7 | 751.6 |
| 0.1378 | 7.49 | 14.98 | 18.74 | 37.46 | 74.94 | 149.8 | 224.8 | 374.6 | 749.4 |
| 0.1380 | 7.47 | 14.94 | 18.68 | 37.36 | 74.72 | 149.4 | 224.2 | 373.6 | 747.2 |
| 0.1382 | 7.45 | 14.90 | 18.63 | 37.25 | 74.51 | 149.0 | 223.5 | 372.5 | 745.1 |
| 0.1384 | 7.43 | 14.85 | 18.58 | 37.14 | 74.29 | 148.5 | 222.9 | 371.4 | 742.9 |
| 0.1386 | 7.41 | 14.81 | 18.52 | 37.03 | 74.08 | 148.1 | 222.2 | 370.3 | 740.8 |
| 0.1388 | 7.39 | 14.77 | 18.47 | 36.93 | 73.86 | 147.7 | 221.6 | 369.3 | 738.6 |
| 0.1390 | 7.37 | 14.72 | 18.42 | 36.82 | 73.65 | 147.2 | 221.0 | 368.2 | 736.5 |
| 0.1392 | 7.34 | 14.68 | 18.36 | 36.71 | 73.44 | 146.8 | 220.3 | 367.1 | 734.4 |
| 0.1394 | 7.32 | 14.64 | 18.31 | 36.61 | 73.23 | 146.4 | 219.7 | 366.1 | 732.3 |
| 0.1396 | 7.30 | 14.60 | 18.26 | 36.50 | 73.02 | 146.0 | 219.1 | 365.0 | 730.2 |
| 0.1398 | 7.28 | 14.56 | 18.21 | 36.40 | 72.81 | 145.6 | 218.4 | 364.0 | 728.1 |
| 0.1400 | 7.26 | 14.52 | 18.15 | 36.30 | 72.60 | 145.2 | 217.8 | 363.0 | 726.0 |
| 0.1402 | 7.24 | 14.47 | 18.10 | 36.19 | 72.40 | 144.7 | 217.2 | 361.9 | 724.0 |
| 0.1404 | 7.22 | 14.43 | 18.05 | 36.09 | 72.19 | 144.3 | 216.6 | 360.9 | 721.9 |
| 0.1406 | 7.20 | 14.39 | 18.00 | 35.99 | 71.98 | 143.9 | 216.0 | 359.9 | 719.8 |
| 0.1408 | 7.18 | 14.35 | 17.95 | 35.88 | 71.78 | 143.5 | 215.3 | 358.8 | 717.8 |
| 0.1410 | 7.16 | 14.31 | 17.90 | 35.78 | 71.58 | 143.1 | 214.7 | 357.8 | 715.8 |
| 0.1412 | 7.14 | 14.27 | 17.85 | 35.68 | 71.37 | 142.7 | 214.1 | 356.8 | 713.7 |
| 0.1414 | 7.12 | 14.23 | 17.80 | 35.58 | 71.17 | 142.3 | 213.5 | 355.8 | 711.7 |
| 0.1416 | 7.10 | 14.19 | 17.75 | 35.48 | 70.97 | 141.9 | 212.9 | 354.8 | 709.7 |
| 0.1418 | 7.08 | 14.15 | 17.70 | 35.38 | 70.77 | 141.5 | 212.3 | 353.8 | 707.7 |
| 0.1420 | 7.06 | 14.11 | 17.65 | 35.28 | 70.57 | 141.1 | 211.7 | 352.8 | 705.7 |
| 0.1422 | 7.04 | 14.07 | 17.60 | 35.18 | 70.37 | 140.7 | 211.1 | 351.8 | 703.7 |
| 0.1424 | 7.02 | 14.03 | 17.55 | 35.08 | 70.18 | 140.3 | 210.5 | 350.8 | 701.8 |
| 0.1426 | 7.00 | 13.99 | 17.50 | 34.98 | 69.98 | 139.9 | 209.9 | 349.8 | 699.8 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1428 | 6.98 | 13.95 | 17.45 | 34.89 | 69.78 | 139.5 | 209.3 | 348.9 | 697.8 |
| 0.1430 | 6.96 | 13.91 | 17.40 | 34.79 | 69.59 | 139.1 | 208.8 | 347.9 | 695.9 |
| 0.1432 | 6.94 | 13.87 | 17.35 | 34.69 | 69.39 | 138.7 | 208.2 | 346.9 | 693.9 |
| 0.1434 | 6.92 | 13.84 | 17.30 | 34.60 | 69.20 | 138.4 | 207.6 | 346.0 | 692.0 |
| 0.1436 | 6.90 | 13.80 | 17.25 | 34.50 | 69.01 | 138.0 | 207.0 | 345.0 | 690.1 |
| 0.1438 | 6.88 | 13.76 | 17.21 | 34.40 | 68.82 | 137.6 | 206.4 | 344.0 | 688.2 |
| 0.1440 | 6.86 | 13.72 | 17.16 | 34.31 | 68.62 | 137.2 | 205.9 | 343.1 | 686.2 |
| 0.1442 | 6.84 | 13.68 | 17.11 | 34.21 | 68.43 | 136.8 | 205.3 | 342.1 | 684.3 |
| 0.1444 | 6.82 | 13.64 | 17.06 | 34.12 | 68.24 | 136.4 | 204.7 | 341.2 | 682.4 |
| 0.1446 | 6.81 | 13.61 | 17.02 | 34.02 | 68.06 | 136.1 | 204.2 | 340.2 | 680.6 |
| 0.1448 | 6.79 | 13.57 | 16.97 | 33.93 | 67.87 | 135.7 | 203.6 | 339.3 | 678.7 |
| 0.1450 | 6.77 | 13.53 | 16.92 | 33.84 | 67.68 | 135.3 | 203.0 | 338.4 | 676.8 |
| 0.1452 | 6.75 | 13.49 | 16.88 | 33.74 | 67.50 | 134.9 | 202.5 | 337.4 | 675.0 |
| 0.1454 | 6.73 | 13.46 | 16.83 | 33.65 | 67.31 | 134.6 | 201.9 | 336.5 | 673.1 |
| 0.1456 | 6.71 | 13.42 | 16.78 | 33.56 | 67.12 | 134.2 | 201.4 | 335.6 | 671.2 |
| 0.1458 | 6.69 | 13.38 | 16.74 | 33.47 | 66.94 | 133.8 | 200.8 | 334.7 | 669.4 |
| 0.1460 | 6.68 | 13.35 | 16.69 | 33.37 | 66.76 | 133.5 | 200.3 | 333.7 | 667.6 |
| 0.1462 | 6.66 | 13.31 | 16.65 | 33.28 | 66.57 | 133.1 | 199.7 | 332.8 | 665.7 |
| 0.1464 | 6.64 | 13.27 | 16.60 | 33.19 | 66.39 | 132.7 | 199.2 | 331.9 | 663.9 |
| 0.1466 | 6.62 | 13.24 | 16.56 | 33.10 | 66.21 | 132.4 | 198.6 | 331.0 | 662.1 |
| 0.1468 | 6.60 | 13.20 | 16.51 | 33.01 | 66.03 | 132.0 | 198.1 | 330.1 | 660.3 |
| 0.1470 | 6.59 | 13.17 | 16.47 | 32.92 | 65.85 | 131.7 | 197.6 | 329.2 | 658.5 |
| 0.1472 | 6.57 | 13.13 | 16.42 | 32.83 | 65.67 | 131.3 | 197.0 | 328.3 | 656.7 |
| 0.1474 | 6.55 | 13.09 | 16.38 | 32.74 | 65.50 | 130.9 | 196.5 | 327.4 | 655.0 |
| 0.1476 | 6.53 | 13.06 | 16.33 | 32.65 | 65.32 | 130.6 | 196.0 | 326.5 | 653.2 |
| 0.1478 | 6.51 | 13.02 | 16.29 | 32.57 | 65.14 | 130.2 | 195.4 | 325.7 | 651.4 |
| 0.1480 | 6.50 | 12.99 | 16.24 | 32.48 | 64.97 | 129.9 | 194.9 | 324.8 | 649.7 |
| 0.1482 | 6.48 | 12.95 | 16.20 | 32.39 | 64.79 | 129.5 | 194.4 | 323.9 | 647.9 |
| 0.1484 | 6.46 | 12.92 | 16.16 | 32.30 | 64.62 | 129.2 | 193.8 | 323.0 | 646.2 |
| 0.1486 | 6.44 | 12.88 | 16.11 | 32.22 | 64.44 | 128.8 | 193.3 | 322.2 | 644.4 |
| 0.1488 | 6.43 | 12.85 | 16.07 | 32.13 | 64.27 | 128.5 | 192.8 | 321.3 | 642.7 |
| 0.1490 | 6.41 | 12.81 | 16.03 | 32.04 | 64.10 | 128.1 | 192.3 | 320.4 | 641.0 |
| 0.1492 | 6.39 | 12.78 | 15.98 | 31.96 | 63.92 | 127.8 | 191.8 | 319.6 | 639.2 |
| 0.1494 | 6.38 | 12.75 | 15.94 | 31.87 | 63.75 | 127.5 | 191.3 | 318.7 | 637.5 |
| 0.1496 | 6.36 | 12.71 | 15.90 | 31.79 | 63.58 | 127.1 | 190.7 | 317.9 | 635.8 |
| 0.1498 | 6.34 | 12.68 | 15.86 | 31.70 | 63.41 | 126.8 | 190.2 | 317.0 | 634.1 |
| 0.1500 | 6.32 | 12.64 | 15.81 | 31.62 | 63.24 | 126.4 | 189.7 | 316.2 | 632.4 |

（续）

| 压痕对角线 $d$/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1502 | 6.31 | 12.61 | 15.77 | 31.53 | 63.08 | 126.1 | 189.2 | 315.3 | 630.8 |
| 0.1504 | 6.29 | 12.58 | 15.73 | 31.45 | 62.91 | 125.8 | 188.7 | 314.5 | 629.1 |
| 0.1506 | 6.27 | 12.54 | 15.69 | 31.37 | 62.74 | 125.4 | 188.2 | 313.7 | 627.4 |
| 0.1508 | 6.26 | 12.51 | 15.65 | 31.28 | 62.58 | 125.1 | 188.7 | 312.8 | 625.8 |
| 0.1510 | 6.24 | 12.48 | 15.60 | 31.20 | 62.41 | 124.8 | 187.2 | 312.0 | 624.1 |
| 0.1512 | 6.22 | 12.44 | 15.56 | 31.12 | 62.24 | 124.4 | 186.7 | 311.2 | 622.4 |
| 0.1514 | 6.21 | 12.41 | 15.52 | 31.04 | 62.08 | 124.1 | 186.2 | 310.4 | 620.8 |
| 0.1516 | 6.19 | 12.38 | 15.48 | 30.95 | 61.92 | 123.8 | 185.7 | 309.5 | 619.2 |
| 0.1518 | 6.18 | 12.35 | 15.44 | 30.87 | 61.75 | 123.5 | 185.3 | 308.7 | 617.5 |
| 0.1520 | 6.16 | 12.31 | 15.40 | 30.79 | 61.59 | 123.1 | 184.8 | 307.9 | 615.9 |
| 0.1522 | 6.14 | 12.28 | 15.36 | 30.71 | 61.43 | 122.8 | 184.3 | 307.1 | 614.3 |
| 0.1524 | 6.13 | 12.25 | 15.32 | 30.63 | 61.27 | 122.5 | 183.8 | 306.3 | 612.7 |
| 0.1526 | 6.11 | 12.22 | 15.28 | 30.55 | 61.11 | 122.2 | 183.3 | 305.5 | 611.1 |
| 0.1528 | 6.09 | 12.19 | 15.24 | 30.47 | 60.95 | 121.9 | 182.8 | 304.7 | 609.5 |
| 0.1530 | 6.08 | 12.15 | 15.20 | 30.39 | 60.79 | 121.5 | 182.4 | 303.9 | 607.9 |
| 0.1532 | 6.06 | 12.12 | 15.16 | 30.31 | 60.63 | 121.2 | 181.9 | 303.1 | 606.3 |
| 0.1534 | 6.05 | 12.09 | 15.12 | 30.23 | 60.47 | 120.9 | 181.4 | 302.3 | 604.7 |
| 0.1536 | 6.03 | 12.06 | 15.08 | 30.15 | 60.31 | 120.6 | 180.9 | 301.5 | 603.1 |
| 0.1538 | 6.02 | 12.03 | 15.04 | 30.07 | 60.16 | 120.3 | 180.5 | 300.7 | 601.6 |
| 0.1540 | 6.00 | 12.00 | 15.00 | 30.00 | 60.00 | 120.0 | 180.0 | 300.0 | 600.0 |
| 0.1542 | 5.98 | 11.97 | 14.96 | 29.92 | 59.85 | 119.7 | 179.5 | 299.2 | 598.5 |
| 0.1544 | 5.97 | 11.93 | 14.92 | 29.84 | 59.69 | 119.3 | 179.1 | 298.4 | 596.9 |
| 0.1546 | 5.95 | 11.90 | 14.89 | 29.76 | 59.54 | 119.0 | 178.6 | 297.6 | 595.4 |
| 0.1548 | 5.94 | 11.87 | 14.85 | 29.69 | 59.38 | 118.7 | 178.1 | 296.9 | 593.8 |
| 0.1550 | 5.92 | 11.84 | 14.81 | 29.61 | 59.23 | 118.4 | 177.7 | 296.1 | 592.3 |
| 0.1552 | 5.91 | 11.81 | 14.77 | 29.53 | 59.08 | 118.1 | 177.2 | 295.3 | 590.8 |
| 0.1554 | 5.89 | 11.78 | 14.73 | 29.46 | 58.93 | 117.8 | 176.8 | 294.6 | 589.3 |
| 0.1556 | 5.88 | 11.75 | 14.70 | 29.38 | 58.77 | 117.5 | 176.3 | 293.8 | 587.7 |
| 0.1558 | 5.86 | 11.72 | 14.66 | 29.31 | 58.62 | 117.2 | 175.9 | 293.1 | 586.2 |
| 0.1560 | 5.85 | 11.69 | 14.62 | 29.23 | 58.47 | 116.9 | 175.4 | 292.3 | 584.7 |
| 0.1562 | 5.83 | 11.66 | 14.58 | 29.16 | 58.32 | 116.6 | 175.0 | 291.6 | 583.2 |
| 0.1564 | 5.82 | 11.63 | 14.55 | 29.08 | 58.17 | 116.3 | 174.5 | 290.8 | 581.7 |
| 0.1566 | 5.80 | 11.60 | 14.51 | 29.01 | 58.03 | 116.0 | 174.1 | 290.1 | 580.3 |
| 0.1568 | 5.79 | 11.57 | 14.47 | 28.93 | 57.88 | 115.7 | 173.6 | 289.3 | 578.8 |
| 0.1570 | 5.77 | 11.54 | 14.43 | 28.86 | 57.73 | 115.4 | 173.2 | 288.6 | 577.3 |
| 0.1572 | 5.76 | 11.51 | 14.40 | 28.79 | 57.58 | 115.1 | 172.8 | 287.9 | 575.8 |
| 0.1574 | 5.74 | 11.48 | 14.36 | 28.71 | 57.44 | 114.8 | 172.3 | 287.1 | 574.4 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1576 | 5.73 | 11.45 | 14.32 | 28.64 | 57.29 | 114.5 | 171.9 | 286.4 | 572.9 |
| 0.1578 | 5.71 | 11.43 | 14.29 | 28.57 | 57.15 | 114.3 | 171.4 | 285.7 | 571.5 |
| 0.1580 | 5.70 | 11.40 | 14.25 | 28.50 | 57.00 | 114.0 | 171.0 | 285.0 | 570.0 |
| 0.1582 | 5.69 | 11.37 | 14.22 | 28.43 | 56.86 | 113.7 | 170.6 | 284.3 | 568.6 |
| 0.1584 | 5.67 | 11.34 | 14.18 | 28.35 | 56.71 | 113.4 | 170.1 | 283.5 | 567.1 |
| 0.1586 | 5.66 | 11.31 | 14.14 | 28.28 | 56.57 | 113.1 | 169.7 | 282.8 | 565.7 |
| 0.1588 | 5.64 | 11.28 | 14.11 | 28.11 | 56.43 | 112.8 | 169.3 | 282.1 | 564.3 |
| 0.1590 | 5.63 | 11.25 | 14.07 | 28.14 | 56.29 | 112.5 | 168.9 | 281.4 | 562.9 |
| 0.1592 | 5.61 | 11.23 | 14.04 | 28.07 | 56.15 | 112.3 | 168.4 | 280.7 | 561.5 |
| 0.1594 | 5.60 | 11.20 | 14.00 | 28.00 | 56.01 | 112.0 | 168.0 | 280.0 | 560.1 |
| 0.1596 | 5.59 | 11.17 | 13.97 | 27.93 | 55.86 | 111.7 | 167.6 | 279.3 | 558.6 |
| 0.1598 | 5.57 | 11.14 | 13.93 | 27.86 | 55.73 | 111.4 | 167.2 | 278.6 | 557.8 |
| 0.1600 | 5.56 | 11.11 | 13.90 | 27.79 | 55.59 | 111.1 | 166.8 | 277.9 | 555.9 |
| 0.1602 | 5.54 | 11.09 | 13.86 | 27.72 | 55.45 | 110.9 | 166.3 | 277.2 | 554.5 |
| 0.1604 | 5.53 | 11.06 | 13.83 | 27.65 | 55.31 | 110.6 | 165.9 | 276.5 | 553.1 |
| 0.1606 | 5.52 | 11.03 | 13.79 | 27.58 | 55.17 | 110.3 | 165.5 | 275.8 | 551.7 |
| 0.1608 | 5.50 | 11.00 | 13.76 | 27.51 | 55.03 | 110.0 | 165.1 | 275.1 | 550.3 |
| 0.1610 | 5.49 | 10.98 | 13.73 | 27.44 | 54.90 | 109.8 | 164.7 | 274.4 | 549.0 |
| 0.1612 | 5.48 | 10.95 | 13.69 | 27.38 | 54.76 | 109.5 | 164.3 | 273.8 | 547.6 |
| 0.1614 | 5.46 | 10.92 | 13.66 | 27.31 | 54.63 | 109.2 | 163.9 | 273.1 | 546.3 |
| 0.1616 | 5.45 | 10.89 | 13.62 | 27.24 | 54.49 | 108.9 | 163.5 | 272.4 | 544.9 |
| 0.1618 | 5.44 | 10.87 | 13.59 | 27.17 | 54.36 | 108.7 | 163.1 | 271.7 | 543.6 |
| 0.1620 | 5.42 | 10.84 | 13.56 | 27.11 | 54.22 | 108.4 | 162.7 | 271.1 | 542.2 |
| 0.1622 | 5.41 | 10.81 | 13.52 | 27.04 | 54.09 | 108.1 | 162.3 | 270.4 | 540.9 |
| 0.1624 | 5.40 | 10.79 | 13.49 | 26.97 | 53.96 | 107.9 | 161.9 | 269.7 | 539.6 |
| 0.1626 | 5.38 | 10.76 | 13.46 | 26.91 | 53.82 | 107.6 | 161.5 | 269.1 | 538.2 |
| 0.1628 | 5.37 | 10.73 | 13.42 | 26.84 | 53.69 | 107.3 | 161.1 | 268.4 | 536.9 |
| 0.1630 | 5.36 | 10.71 | 13.39 | 26.78 | 53.56 | 107.1 | 160.7 | 267.8 | 535.6 |
| 0.1632 | 5.34 | 10.68 | 13.36 | 26.71 | 53.43 | 106.8 | 160.3 | 267.1 | 534.3 |
| 0.1634 | 5.33 | 10.66 | 13.33 | 26.64 | 53.30 | 106.6 | 159.9 | 266.4 | 533.0 |
| 0.1636 | 5.32 | 10.63 | 13.29 | 26.58 | 53.17 | 106.3 | 159.5 | 265.8 | 531.7 |
| 0.1638 | 5.30 | 10.60 | 13.26 | 26.51 | 53.04 | 106.0 | 159.1 | 265.1 | 530.4 |
| 0.1640 | 5.29 | 10.58 | 13.23 | 26.45 | 52.91 | 105.8 | 158.7 | 264.5 | 529.1 |
| 0.1642 | 5.28 | 10.55 | 13.20 | 26.39 | 52.78 | 105.5 | 158.3 | 263.9 | 527.8 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1644 | 5.27 | 10.53 | 13.16 | 26.32 | 52.65 | 105.3 | 158.0 | 263.2 | 526.5 |
| 0.1646 | 5.25 | 10.50 | 13.13 | 26.26 | 52.52 | 105.0 | 157.6 | 262.6 | 525.2 |
| 0.1648 | 5.24 | 10.48 | 13.10 | 26.19 | 52.40 | 104.8 | 157.2 | 261.9 | 524.0 |
| 0.1650 | 5.23 | 10.45 | 13.07 | 26.13 | 52.27 | 104.5 | 156.8 | 261.3 | 522.7 |
| 0.1652 | 5.21 | 10.42 | 13.04 | 26.07 | 52.14 | 104.2 | 156.4 | 260.7 | 521.4 |
| 0.1654 | 5.20 | 10.40 | 13.01 | 26.00 | 52.02 | 104.0 | 156.0 | 260.0 | 520.2 |
| 0.1656 | 5.19 | 10.37 | 12.97 | 25.94 | 51.89 | 103.7 | 155.7 | 259.4 | 518.9 |
| 0.1658 | 5.18 | 10.35 | 12.94 | 25.88 | 51.76 | 103.5 | 155.3 | 258.8 | 517.6 |
| 0.1660 | 5.16 | 10.32 | 12.91 | 25.82 | 51.64 | 103.2 | 154.9 | 258.2 | 516.4 |
| 0.1662 | 5.15 | 10.30 | 12.88 | 25.75 | 51.52 | 103.0 | 154.5 | 257.5 | 515.2 |
| 0.1664 | 5.14 | 10.27 | 12.85 | 25.69 | 51.39 | 102.7 | 154.2 | 256.9 | 513.9 |
| 0.1666 | 5.13 | 10.25 | 12.82 | 25.63 | 51.27 | 102.5 | 153.8 | 256.3 | 512.7 |
| 0.1668 | 5.11 | 10.23 | 12.79 | 25.57 | 51.15 | 102.3 | 153.4 | 255.7 | 511.5 |
| 0.1670 | 5.10 | 10.20 | 12.76 | 25.51 | 51.02 | 102.0 | 153.1 | 255.1 | 510.2 |
| 0.1672 | 5.09 | 10.18 | 12.73 | 25.45 | 50.90 | 101.8 | 152.7 | 254.5 | 509.0 |
| 0.1674 | 5.08 | 10.15 | 12.70 | 25.39 | 50.78 | 101.5 | 152.3 | 253.9 | 507.8 |
| 0.1676 | 5.07 | 10.13 | 12.67 | 25.33 | 50.66 | 101.3 | 152.0 | 253.3 | 506.6 |
| 0.1678 | 5.05 | 10.10 | 12.64 | 25.27 | 50.54 | 101.0 | 151.6 | 252.7 | 505.4 |
| 0.1680 | 5.04 | 10.08 | 12.61 | 25.21 | 50.42 | 100.8 | 151.3 | 252.1 | 504.2 |
| 0.1682 | 5.03 | 10.06 | 12.58 | 25.15 | 50.30 | 100.6 | 150.9 | 251.5 | 503.0 |
| 0.1684 | 5.02 | 10.03 | 12.55 | 25.09 | 50.18 | 100.3 | 150.5 | 250.9 | 501.8 |
| 0.1686 | 5.01 | 10.01 | 12.52 | 25.03 | 50.06 | 100.1 | 150.2 | 250.3 | 500.6 |
| 0.1688 | 4.99 | 9.98 | 12.49 | 24.97 | 49.94 | 99.85 | 149.8 | 249.7 | 499.4 |
| 0.1690 | 4.98 | 9.96 | 12.46 | 24.91 | 49.82 | 99.61 | 149.5 | 249.1 | 498.2 |
| 0.1692 | 4.97 | 9.94 | 12.43 | 24.85 | 49.71 | 99.38 | 149.1 | 248.5 | 497.1 |
| 0.1694 | 4.96 | 9.91 | 12.40 | 24.79 | 49.59 | 99.14 | 148.8 | 247.9 | 495.9 |
| 0.1696 | 4.95 | 9.89 | 12.37 | 24.73 | 49.47 | 98.91 | 148.4 | 247.3 | 494.7 |
| 0.1698 | 4.94 | 9.87 | 12.34 | 24.67 | 49.35 | 98.67 | 148.1 | 246.7 | 493.5 |
| 0.1700 | 4.92 | 9.84 | 12.31 | 24.62 | 49.24 | 98.44 | 147.7 | 246.2 | 492.4 |
| 0.1702 | 4.91 | 9.82 | 12.28 | 24.56 | 49.12 | 98.21 | 147.4 | 245.6 | 491.2 |
| 0.1704 | 4.90 | 9.80 | 12.25 | 24.50 | 49.01 | 97.98 | 147.0 | 245.0 | 490.1 |
| 0.1706 | 4.89 | 9.78 | 12.22 | 24.44 | 48.89 | 97.75 | 146.7 | 244.4 | 488.9 |
| 0.1708 | 4.88 | 9.75 | 12.20 | 24.39 | 48.78 | 97.52 | 146.3 | 243.9 | 487.8 |
| 0.1710 | 4.87 | 9.73 | 12.17 | 24.33 | 48.66 | 97.29 | 146.0 | 243.3 | 486.6 |
| 0.1712 | 4.86 | 9.71 | 12.14 | 24.27 | 48.55 | 97.07 | 145.7 | 242.7 | 485.5 |
| 0.1714 | 4.84 | 9.68 | 12.11 | 24.22 | 48.44 | 96.84 | 145.3 | 242.2 | 484.4 |
| 0.1716 | 4.83 | 9.66 | 12.08 | 24.16 | 48.32 | 96.62 | 145.0 | 241.6 | 483.2 |
| 0.1718 | 4.82 | 9.64 | 12.05 | 24.10 | 48.21 | 96.39 | 144.6 | 241.0 | 482.1 |
| 0.1720 | 4.81 | 9.62 | 12.03 | 24.05 | 48.10 | 96.17 | 144.3 | 240.5 | 481.0 |
| 0.1722 | 4.80 | 9.59 | 12.00 | 23.99 | 47.99 | 95.94 | 144.0 | 239.9 | 479.9 |
| 0.1724 | 4.79 | 9.57 | 11.97 | 23.94 | 47.88 | 95.72 | 143.6 | 239.4 | 478.8 |

（续）

| 压痕对角线 $d$/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1726 | 4.78 | 9.55 | 11.94 | 23.88 | 47.77 | 95.50 | 145.3 | 238.8 | 477.7 |
| 0.1728 | 4.77 | 9.53 | 11.92 | 23.82 | 47.66 | 95.28 | 143.0 | 238.2 | 476.6 |
| 0.1730 | 4.75 | 9.51 | 11.89 | 23.77 | 47.55 | 95.06 | 142.6 | 237.7 | 475.5 |
| 0.1732 | 4.74 | 9.48 | 11.86 | 23.71 | 47.44 | 94.84 | 142.3 | 237.1 | 474.4 |
| 0.1734 | 4.73 | 9.46 | 11.83 | 23.66 | 47.33 | 94.62 | 142.0 | 236.6 | 473.3 |
| 0.1736 | 4.72 | 9.44 | 11.81 | 23.61 | 47.22 | 94.40 | 141.7 | 236.1 | 472.2 |
| 0.1738 | 4.71 | 9.42 | 11.78 | 23.55 | 47.11 | 94.19 | 141.3 | 235.5 | 471.1 |
| 0.1740 | 4.70 | 9.40 | 11.75 | 23.50 | 47.00 | 93.97 | 141.0 | 235.0 | 470.0 |
| 0.1742 | 4.69 | 9.38 | 11.72 | 23.44 | 46.89 | 93.75 | 140.7 | 234.4 | 468.9 |
| 0.1744 | 4.68 | 9.35 | 11.70 | 23.39 | 46.79 | 93.54 | 140.4 | 233.9 | 467.9 |
| 0.1746 | 4.67 | 9.33 | 11.67 | 23.34 | 46.57 | 93.32 | 140.0 | 233.4 | 466.8 |
| 0.1748 | 4.66 | 9.31 | 11.64 | 23.28 | 46.57 | 93.11 | 139.7 | 232.8 | 465.7 |
| 0.1750 | 4.65 | 9.29 | 11.62 | 23.23 | 46.47 | 92.90 | 139.4 | 232.3 | 464.7 |
| 0.1752 | 4.64 | 9.27 | 11.59 | 23.18 | 46.36 | 92.69 | 139.1 | 231.8 | 463.6 |
| 0.1754 | 4.63 | 9.25 | 11.57 | 23.12 | 46.25 | 92.47 | 138.8 | 231.2 | 462.5 |
| 0.1756 | 4.61 | 9.23 | 11.54 | 23.07 | 46.15 | 92.26 | 138.4 | 230.7 | 461.5 |
| 0.1758 | 4.60 | 9.21 | 11.51 | 23.02 | 46.04 | 92.05 | 138.1 | 230.2 | 460.4 |
| 0.1760 | 4.59 | 9.18 | 11.49 | 22.97 | 45.94 | 91.85 | 137.8 | 229.7 | 459.4 |
| 0.1762 | 4.58 | 9.16 | 11.46 | 22.91 | 45.83 | 91.64 | 137.5 | 229.1 | 458.3 |
| 0.1764 | 4.57 | 9.14 | 11.43 | 22.86 | 45.73 | 91.43 | 137.2 | 228.6 | 457.3 |
| 0.1766 | 4.56 | 9.12 | 11.41 | 22.81 | 45.63 | 91.22 | 136.9 | 228.1 | 456.3 |
| 0.1768 | 4.55 | 9.10 | 11.38 | 22.76 | 45.52 | 91.02 | 136.6 | 227.6 | 455.2 |
| 0.1770 | 4.54 | 9.08 | 11.36 | 22.71 | 45.42 | 90.81 | 136.3 | 227.1 | 454.2 |
| 0.1772 | 4.53 | 9.06 | 11.33 | 22.66 | 45.32 | 90.61 | 136.0 | 226.6 | 453.2 |
| 0.1774 | 4.52 | 9.04 | 11.31 | 22.61 | 45.22 | 90.40 | 135.6 | 226.1 | 452.2 |
| 0.1776 | 4.51 | 9.02 | 11.28 | 22.55 | 45.11 | 90.20 | 135.3 | 225.5 | 451.1 |
| 0.1778 | 4.50 | 9.00 | 11.25 | 22.50 | 45.01 | 90.00 | 135.0 | 225.0 | 450.1 |
| 0.1780 | 4.49 | 8.98 | 11.23 | 22.45 | 44.91 | 89.79 | 134.7 | 224.5 | 449.1 |
| 0.1782 | 4.48 | 8.96 | 11.20 | 22.40 | 44.81 | 89.59 | 134.4 | 224.0 | 448.1 |
| 0.1784 | 4.47 | 8.94 | 11.18 | 22.35 | 44.71 | 89.39 | 134.1 | 223.5 | 447.1 |
| 0.1786 | 4.46 | 8.92 | 11.15 | 22.30 | 44.61 | 89.19 | 133.8 | 223.0 | 446.1 |
| 0.1788 | 4.45 | 8.90 | 11.13 | 22.25 | 44.51 | 88.99 | 133.5 | 222.5 | 445.1 |
| 0.1790 | 4.44 | 8.88 | 11.10 | 22.20 | 44.41 | 88.79 | 133.2 | 222.0 | 444.1 |
| 0.1792 | 4.43 | 8.86 | 11.08 | 22.15 | 44.31 | 88.59 | 132.9 | 221.5 | 443.1 |
| 0.1794 | 4.42 | 8.84 | 11.06 | 22.10 | 44.21 | 88.40 | 132.6 | 221.0 | 442.1 |
| 0.1796 | 4.41 | 8.82 | 11.03 | 22.05 | 44.12 | 88.20 | 132.3 | 220.5 | 441.2 |
| 0.1798 | 4.40 | 8.80 | 11.01 | 22.01 | 44.02 | 88.00 | 132.1 | 220.1 | 440.2 |
| 0.1800 | 4.39 | 8.78 | 10.98 | 21.96 | 43.92 | 87.81 | 131.8 | 219.6 | 439.2 |
| 0.1802 | 4.38 | 8.76 | 10.96 | 21.91 | 43.82 | 87.61 | 131.5 | 219.1 | 438.2 |
| 0.1804 | 4.37 | 8.74 | 10.93 | 21.86 | 43.73 | 87.42 | 131.2 | 218.6 | 437.3 |
| 0.1806 | 4.36 | 8.72 | 10.91 | 21.81 | 43.63 | 87.23 | 130.9 | 218.1 | 436.8 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1808 | 4.35 | 8.70 | 10.88 | 21.76 | 43.53 | 87.03 | 130.6 | 217.6 | 435.3 |
| 0.1810 | 4.34 | 8.68 | 10.86 | 21.71 | 43.44 | 86.84 | 130.3 | 217.1 | 434.4 |
| 0.1812 | 4.33 | 8.66 | 10.84 | 21.67 | 43.34 | 86.65 | 130.0 | 216.7 | 433.4 |
| 0.1814 | 4.32 | 8.65 | 10.81 | 21.62 | 43.24 | 86.46 | 129.7 | 216.2 | 432.4 |
| 0.1816 | 4.31 | 8.63 | 10.79 | 21.57 | 43.15 | 86.27 | 129.4 | 215.7 | 431.5 |
| 0.1818 | 4.31 | 8.61 | 10.77 | 21.52 | 43.05 | 86.08 | 129.2 | 215.2 | 430.5 |
| 0.1820 | 4.30 | 8.59 | 10.74 | 21.48 | 42.96 | 85.89 | 128.9 | 214.8 | 429.6 |
| 0.1822 | 4.29 | 8.57 | 10.72 | 21.43 | 42.87 | 85.70 | 128.6 | 214.3 | 428.7 |
| 0.1824 | 4.28 | 8.55 | 10.69 | 21.38 | 42.77 | 85.51 | 128.3 | 213.8 | 427.7 |
| 0.1826 | 4.27 | 8.53 | 10.67 | 21.34 | 42.68 | 85.33 | 128.0 | 213.4 | 426.8 |
| 0.1828 | 4.26 | 8.51 | 10.65 | 21.29 | 42.58 | 85.14 | 127.8 | 212.9 | 425.8 |
| 0.1830 | 4.25 | 8.50 | 10.62 | 21.24 | 42.49 | 84.95 | 127.5 | 212.4 | 424.9 |
| 0.1832 | 4.24 | 8.48 | 10.60 | 21.20 | 42.40 | 84.77 | 127.2 | 212.0 | 424.0 |
| 0.1834 | 4.23 | 8.46 | 10.58 | 21.15 | 42.31 | 84.58 | 126.9 | 211.5 | 423.1 |
| 0.1836 | 4.22 | 8.44 | 10.56 | 21.10 | 42.21 | 84.40 | 126.6 | 211.0 | 422.1 |
| 0.1838 | 4.21 | 8.42 | 10.53 | 21.06 | 42.12 | 84.22 | 126.4 | 210.6 | 421.2 |
| 0.1840 | 4.20 | 8.40 | 10.51 | 21.01 | 42.03 | 84.03 | 126.1 | 210.1 | 420.3 |
| 0.1842 | 4.19 | 8.38 | 10.49 | 20.97 | 41.94 | 83.85 | 125.8 | 209.7 | 419.4 |
| 0.1844 | 4.18 | 8.37 | 10.46 | 20.92 | 41.85 | 83.67 | 125.5 | 209.2 | 418.5 |
| 0.1846 | 4.18 | 8.35 | 10.44 | 20.88 | 41.76 | 83.49 | 125.3 | 208.8 | 417.6 |
| 0.1848 | 4.17 | 8.33 | 10.42 | 20.83 | 41.67 | 83.31 | 125.0 | 208.3 | 416.7 |
| 0.1850 | 4.16 | 8.31 | 10.40 | 20.79 | 41.58 | 83.13 | 124.7 | 207.9 | 415.8 |
| 0.1852 | 4.15 | 8.29 | 10.37 | 20.74 | 41.49 | 82.95 | 124.5 | 207.4 | 414.9 |
| 0.1854 | 4.14 | 8.28 | 10.35 | 20.70 | 41.40 | 82.77 | 124.2 | 207.0 | 414.0 |
| 0.1856 | 4.13 | 8.26 | 10.33 | 20.65 | 41.31 | 82.59 | 123.9 | 206.5 | 413.1 |
| 0.1858 | 4.12 | 8.24 | 10.31 | 20.61 | 41.22 | 82.41 | 123.7 | 206.1 | 412.2 |
| 0.1860 | 4.11 | 8.22 | 10.28 | 20.56 | 41.13 | 82.23 | 123.4 | 205.6 | 411.3 |
| 0.1862 | 4.10 | 8.21 | 10.26 | 20.52 | 41.04 | 82.06 | 123.1 | 205.2 | 410.4 |
| 0.1864 | 4.10 | 8.19 | 10.24 | 20.47 | 40.96 | 81.88 | 122.9 | 204.7 | 409.6 |
| 0.1866 | 4.09 | 8.17 | 10.22 | 20.43 | 40.87 | 81.71 | 122.6 | 204.3 | 408.7 |
| 0.1868 | 4.08 | 8.15 | 10.20 | 20.39 | 40.78 | 81.53 | 122.3 | 203.9 | 407.8 |
| 0.1870 | 4.07 | 8.14 | 10.17 | 20.34 | 40.69 | 81.36 | 122.1 | 203.4 | 406.9 |
| 0.1872 | 4.06 | 8.12 | 10.15 | 20.30 | 40.61 | 81.18 | 121.8 | 203.0 | 406.1 |
| 0.1874 | 4.05 | 8.10 | 10.13 | 20.26 | 40.52 | 81.01 | 121.6 | 202.6 | 405.2 |
| 0.1876 | 4.04 | 8.08 | 10.11 | 20.21 | 40.43 | 80.84 | 121.3 | 202.1 | 404.3 |
| 0.1878 | 4.03 | 8.07 | 10.09 | 20.17 | 40.35 | 80.67 | 121.0 | 201.7 | 403.5 |
| 0.1880 | 4.03 | 8.05 | 10.07 | 20.13 | 40.26 | 80.49 | 120.8 | 201.3 | 402.6 |
| 0.1882 | 4.02 | 8.03 | 10.05 | 20.09 | 40.18 | 80.32 | 120.5 | 200.9 | 401.8 |
| 0.1884 | 4.01 | 8.02 | 10.02 | 20.04 | 40.09 | 80.15 | 120.3 | 200.4 | 400.9 |
| 0.1886 | 4.00 | 8.00 | 10.00 | 20.00 | 40.01 | 79.98 | 120.0 | 200.0 | 400.1 |
| 0.1888 | 3.99 | 7.98 | 9.98 | 19.96 | 39.92 | 79.81 | 119.8 | 199.6 | 399.2 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1890 | 3.98 | 7.96 | 9.96 | 19.92 | 39.84 | 79.65 | 119.5 | 199.2 | 398.4 |
| 0.1892 | 3.98 | 7.95 | 9.94 | 19.87 | 39.75 | 79.48 | 119.3 | 198.7 | 397.5 |
| 0.1894 | 3.97 | 7.93 | 9.92 | 19.83 | 39.67 | 79.31 | 119.0 | 198.3 | 396.7 |
| 0.1896 | 3.96 | 7.91 | 9.90 | 19.79 | 39.58 | 79.14 | 118.8 | 197.9 | 395.8 |
| 0.1898 | 3.95 | 7.90 | 9.88 | 19.75 | 39.50 | 78.98 | 118.5 | 197.5 | 395.0 |
| 0.1900 | 3.94 | 7.88 | 9.86 | 19.71 | 39.42 | 78.81 | 118.3 | 197.1 | 394.0 |
| 0.1902 | 3.93 | 7.86 | 9.84 | 19.66 | 39.34 | 78.64 | 118.0 | 196.6 | 393.4 |
| 0.1904 | 3.93 | 7.85 | 9.81 | 19.62 | 39.25 | 78.48 | 117.8 | 196.2 | 392.5 |
| 0.1906 | 3.92 | 7.83 | 9.79 | 19.58 | 39.17 | 78.31 | 117.5 | 195.8 | 391.7 |
| 0.1908 | 3.91 | 7.81 | 9.77 | 19.54 | 39.09 | 78.15 | 117.3 | 195.4 | 390.9 |
| 0.1910 | 3.90 | 7.80 | 9.75 | 19.50 | 39.01 | 77.99 | 117.0 | 195.0 | 390.1 |
| 0.1912 | 3.89 | 7.78 | 9.73 | 19.46 | 38.93 | 77.82 | 116.8 | 194.6 | 389.3 |
| 0.1914 | 3.88 | 7.77 | 9.71 | 19.42 | 38.84 | 77.66 | 116.5 | 194.2 | 388.4 |
| 0.1916 | 3.88 | 7.75 | 9.69 | 19.38 | 38.76 | 77.50 | 116.3 | 193.8 | 387.6 |
| 0.1918 | 3.87 | 7.73 | 9.67 | 19.34 | 38.68 | 77.34 | 116.0 | 193.4 | 386.8 |
| 0.1920 | 3.86 | 7.72 | 9.65 | 19.30 | 38.60 | 77.18 | 115.8 | 193.0 | 386.0 |
| 0.1922 | 3.85 | 7.70 | 9.63 | 19.26 | 38.52 | 77.02 | 115.6 | 192.6 | 385.2 |
| 0.1924 | 3.84 | 7.69 | 9.61 | 19.22 | 38.44 | 76.85 | 115.3 | 192.2 | 384.4 |
| 0.1926 | 3.84 | 7.67 | 9.59 | 19.18 | 38.36 | 76.70 | 115.1 | 191.8 | 383.6 |
| 0.1928 | 3.83 | 7.65 | 9.57 | 19.14 | 38.28 | 76.54 | 114.8 | 191.4 | 382.8 |
| 0.1930 | 3.82 | 7.64 | 9.55 | 19.10 | 38.20 | 76.38 | 114.6 | 191.0 | 382.0 |
| 0.1932 | 3.81 | 7.62 | 9.53 | 19.06 | 38.12 | 76.22 | 114.4 | 190.6 | 381.2 |
| 0.1934 | 3.80 | 7.61 | 9.51 | 19.02 | 38.04 | 76.06 | 114.1 | 190.2 | 380.4 |
| 0.1936 | 3.80 | 7.59 | 9.49 | 18.98 | 37.97 | 75.91 | 113.9 | 189.8 | 379.7 |
| 0.1938 | 3.79 | 7.57 | 9.47 | 18.94 | 37.89 | 75.75 | 113.7 | 189.4 | 378.9 |
| 0.1940 | 3.78 | 7.56 | 9.45 | 18.90 | 37.81 | 75.59 | 113.4 | 189.0 | 378.1 |
| 0.1942 | 3.77 | 7.54 | 9.43 | 18.86 | 37.73 | 75.44 | 113.2 | 188.6 | 377.3 |
| 0.1944 | 3.77 | 7.53 | 9.41 | 18.82 | 37.65 | 75.28 | 113.0 | 188.2 | 376.5 |
| 0.1946 | 3.76 | 7.51 | 9.40 | 18.79 | 37.58 | 75.13 | 112.7 | 187.9 | 375.8 |
| 0.1948 | 3.75 | 7.50 | 9.38 | 18.75 | 37.50 | 74.97 | 112.5 | 187.5 | 375.0 |
| 0.1950 | 3.74 | 7.48 | 9.36 | 18.71 | 37.42 | 74.82 | 112.3 | 187.1 | 374.2 |
| 0.1952 | 3.73 | 7.47 | 9.34 | 18.67 | 37.35 | 74.67 | 112.0 | 186.7 | 373.5 |
| 0.1954 | 3.73 | 7.45 | 9.32 | 18.63 | 37.27 | 74.51 | 111.8 | 186.3 | 372.7 |
| 0.1956 | 3.72 | 7.44 | 9.30 | 18.59 | 37.19 | 74.36 | 111.6 | 185.9 | 371.9 |
| 0.1958 | 3.71 | 7.42 | 9.28 | 18.56 | 37.12 | 74.21 | 111.4 | 185.6 | 371.2 |
| 0.1960 | 3.70 | 7.41 | 9.26 | 18.52 | 37.04 | 74.06 | 111.1 | 185.2 | 370.4 |
| 0.1962 | 3.70 | 7.39 | 9.24 | 18.48 | 36.97 | 73.91 | 110.9 | 184.8 | 369.7 |
| 0.1964 | 3.69 | 7.38 | 9.22 | 18.44 | 36.89 | 73.76 | 110.7 | 184.4 | 368.9 |
| 0.1966 | 3.68 | 7.36 | 9.21 | 18.41 | 36.82 | 73.61 | 110.4 | 184.1 | 368.2 |
| 0.1968 | 3.67 | 7.35 | 9.19 | 18.37 | 36.74 | 73.46 | 110.2 | 183.7 | 367.4 |
| 0.1970 | 3.67 | 7.33 | 9.17 | 18.33 | 36.67 | 73.31 | 110.0 | 183.3 | 366.7 |

（续）

| 压痕对角线 d/mm | 试验力/N | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.09807 | 0.1961 | 0.2452 | 0.4903 | 0.9807 | 1.9612 | 2.9420 | 4.903 | 9.807 |
| | 努氏硬度 | | | | | | | | |
| | HK 0.01 | HK 0.02 | HK 0.025 | HK 0.05 | HK 0.1 | HK 0.2 | HK 0.3 | HK 0.5 | HK 1 |
| 0.1972 | 3.66 | 7.32 | 9.15 | 18.29 | 36.59 | 73.16 | 109.8 | 182.9 | 365.9 |
| 0.1974 | 3.65 | 7.30 | 9.13 | 18.26 | 36.52 | 73.01 | 109.6 | 182.6 | 365.2 |
| 0.1976 | 3.64 | 7.29 | 9.11 | 18.22 | 36.44 | 72.86 | 109.3 | 182.2 | 364.4 |
| 0.1978 | 3.64 | 7.27 | 9.09 | 18.18 | 36.37 | 72.72 | 109.1 | 181.8 | 363.7 |
| 0.1980 | 3.63 | 7.26 | 9.08 | 18.15 | 36.30 | 72.57 | 108.9 | 181.5 | 363.0 |
| 0.1982 | 3.62 | 7.24 | 9.06 | 18.11 | 36.22 | 72.42 | 108.7 | 181.1 | 362.2 |
| 0.1984 | 3.62 | 7.23 | 9.04 | 18.07 | 36.15 | 72.28 | 108.5 | 180.7 | 361.5 |
| 0.1986 | 3.61 | 7.21 | 9.02 | 18.04 | 36.08 | 72.13 | 108.2 | 180.4 | 360.8 |
| 0.1988 | 3.60 | 7.20 | 9.00 | 18.00 | 36.01 | 71.99 | 108.0 | 180.0 | 360.1 |
| 0.1990 | 3.59 | 7.18 | 8.98 | 17.96 | 35.93 | 71.84 | 107.8 | 179.6 | 359.3 |
| 0.1992 | 3.59 | 7.17 | 8.97 | 17.93 | 35.86 | 71.70 | 107.6 | 179.3 | 358.6 |
| 0.1994 | 3.58 | 7.16 | 8.95 | 17.89 | 35.79 | 71.55 | 107.4 | 178.9 | 357.9 |
| 0.1996 | 3.57 | 7.14 | 8.93 | 17.86 | 35.72 | 71.41 | 107.2 | 178.6 | 357.2 |
| 0.1998 | 3.56 | 7.13 | 8.91 | 17.82 | 35.65 | 71.27 | 106.9 | 178.2 | 356.5 |
| 0.2000 | 3.56 | 7.11 | 8.90 | 17.79 | 35.58 | 71.13 | 106.7 | 177.9 | 355.8 |

## 3.6　金属材料肖氏硬度试验

金属材料肖氏硬度试验按照 GB/T 4341—2001《金属肖氏硬度试验方法》进行。

### 3.6.1　试样

1）试样的试验面一般为平面，对于曲面试样，其试验面的曲率半径应不小于 32mm。

2）试样的质量应至少在 0.1kg 以上。

3）试样应有足够的厚度，以保证测量的硬度值不受试样台硬度的影响。试样的厚度一般应在 10mm 以上。

4）试样的试验面积应尽可能大。

5）肖氏硬度小于 50HS 的试样，表面粗糙度 *Ra* 应不大于 1.6μm；肖氏硬度大于 50HS 时，表面粗糙度 *Ra* 应不大于 0.8μm。

6）试样的表面应无氧化皮及外来污物，尤其不应有油脂。

7）试样不应带有磁性。

### 3.6.2　试验设备

肖氏硬度计适用于测定金属材料的肖氏硬度值。肖氏硬度计便于携带，特别适用于

冶金、重型机械行业的中大型工件，如大型构件、铸件、锻件、曲轴、轧辊、特大型齿轮、机床导轨等工件。与其他硬度计相比，肖氏硬度计的准确度稍差，受测试时的垂直性、试样表面粗糙度等因素的影响，数据分散性较大，其测试结果的比较只限于弹性模量相同的材料。它对试样的厚度和质量都有一定要求，不适于较薄和较小试样，但是它是一种轻便的手提式仪器，便于现场测试，其结构简单，便于操作，测试效率高。肖氏硬度计如图 3-12 所示。

### 3.6.3　试验内容及结果表示



图 3-12　肖氏硬度计

**1. 试验要求**

1）试验一般在 10 ~ 35℃ 的温度下进行，对温度要求严格的试验，应在 23℃ ±5℃ 之内进行。对于温度变化敏感的材料，应在材料标准中规定试验温度。

2）试验前，应使用与试样硬度值接近的肖氏硬度标准块按 JJG 346 对硬度计进行检验。

3）试验时，试样应稳固地放置在机架的试样台上。由于试样的形状、尺寸、质量等关系，需将测量筒从机架上取下，以手持或安放在特殊形状的支架上使用。试验结果应注明手持测量或支架测量。

4）硬度计应安置在稳固的基础上，试验时测量筒应保持垂直状态，试验面应与冲头作用方向垂直。手持测量筒时，要特别注意保持垂直状态。

**2. 试验原理**

将规定形状的金刚石冲头从固定的高度 $h_0$ 落在试样表面上，冲头弹起一定高度 $h$，用下式计算肖氏硬度值：

$$HS = K\frac{h}{h_0}$$

式中　HS——肖氏硬度；

$h_0$——固定的高度，单位为 mm；

$h$——冲头弹起的高度，单位为 mm；

$K$——肖氏硬度系数，对于目测型（C 型）肖氏硬度计，$K$ 取 $10^3/65$，对于指示型（D 型）肖氏硬度计，$K$ 取 140。

**3. 硬度值的表示**

肖氏硬度符号为 HS，HS 后面的符号表示硬度计类型。例如：28HSC 表示用 C 型（目测型）肖氏硬度计测定的肖氏硬度值为 28，50HSD 表示用 D 型（指示型）肖氏硬度计测定的肖氏硬度值为 50。

**4. 试验程序**

1）测量硬度时，试样在试样台上受到的压力约为 200N。试样质量在 20kg 以上，手持测量筒或在特殊形状的支架上进行试验时，对测量筒的压力应以测量筒在试样上保持稳定为宜。

2）对于 D 型肖氏硬度计，操作鼓轮的回转时间约为 1s，复位时的操作以手动缓慢

进行。对于C型肖氏硬度计，读取冲头反弹最高位置时的瞬间读数。

3）试样两相邻压痕中心距离应不小于1mm，压痕中心距试样边缘的距离应不小于4mm。

4）肖氏硬度值的读数应精确至0.5HS，以连续5次有效读数的平均值作为一个肖氏硬度测量值。

## 3.7　金属材料里氏硬度试验

金属材料里氏硬度试验按照GB/T 17394—1998《金属里氏硬度试验方法》进行。

### 3.7.1　试样

1）在制备试样表面过程中，应尽量避免由于受热、冷加工等对试样表面硬度的影响。

2）试样的试验面最好是平面，试验面应具有金属光泽，不应有氧化皮及其他污物，试样表面粗糙度应符合表3-25中的要求。

**表3-25　试样的表面粗糙度要求**　（单位：μm）

| 冲击装置类型 | 试样表面粗糙度 $Ra$ |
|---|---|
| D、DC型 | ≤1.6 |
| G型 | ≤6.3 |
| C型 | ≤0.4 |

3）试样必须有足够的质量及刚性，以保证在冲击过程中不产生位移或弹动。试样的质量应符合表3-26中的规定。

**表3-26　试样的质量要求**　（单位：kg）

| 冲击装置类型 | 试样质量 | | |
|---|---|---|---|
| | 稳定装置 | 固定或夹持 | 需耦合 |
| D、DC型 | >5 | 2~5 | 0.05~2 |
| G型 | >15 | 5~15 | 0.5~5 |
| C型 | >1.5 | 0.5~1.5 | 0.02~0.5 |

4）试样应具有足够的厚度，试样最小厚度应符合表3-27中的规定。

**表3-27　试样的最小厚度要求**　（单位：mm）

| 冲击装置类型 | 试样最小厚度 |
|---|---|
| D、DC型 | 5 |
| G型 | 10 |
| C型 | 1 |

5）对于具有表面硬化层的试样，硬化层深度应符合表3-28中的规定。

表 3-28　试样的硬化层深度要求　　　　（单位：mm）

| 冲击装置类型 | 表面硬化层深度 |
|---|---|
| D、DC 型 | ≥0.8 |
| C 型 | ≥0.2 |

6）对于凹、凸圆柱面及球面试样，其表面曲率半径应符合表 3-29 中的规定。

表 3-29　试样的表面曲率半径要求　　　　（单位：mm）

| 冲击装置类型 | 表面曲率半径 |
|---|---|
| D、DC 型 | ≥30 |
| G 型 | ≥50 |

7）对于表面为曲面的试样，应使用适当的支撑环，以保证冲头冲击瞬间位置偏差在 ±0.5mm 之内。

## 3.7.2　试验设备

里氏硬度计是一种新型的硬度测试仪器，具有测试精度高、体积小、操作容易、携带方便，测量范围宽的特点。它可将测得的硬度值自动转换成布氏、洛氏、维氏、肖氏等硬度值并打印记录，还可配置适合于各种测试场合的配件。里氏硬度计可以满足于各种测试环境和条件。

便携式里氏硬度计广泛应用于已安装的机械或永久性组装部件、轴承及其他零件、压力容器、汽轮发电机组及其设备的失效分析、重型工件、试验空间很狭小的工件、要求对测试结果有正规的原始记录、金属材料仓库的材料区分、大型工件大范围内多处测量部位的快速检验。里氏硬度计如图 3-13 所示。



图 3-13　里氏硬度计

里氏硬度计的主要技术参数应符合表 3-30 中的要求，示值误差及重复性应不大于表 3-31 中的规定。

表 3-30　里氏硬度计的主要技术参数

| 冲击装置类型 | 主要参数 | | | | 试验范围 HL | 用途 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 冲击体质量 /g | 冲击能量 /J | 冲头直径 /mm | 冲头材料 | | |
| D 型 | 5.5 | 11.0 | 3 | 碳化钨 | 200 ~ 900 | 一般场合孔内,小空间 |
| DC 型 | 5.5 | 11.0 | 3 | 碳化钨 | 200 ~ 900 | |
| G 型 | 20.0 | 90.0 | 5 | 碳化钨 | 300 ~ 750 | 大型铸锻件表面层及薄壁件 |
| C 型 | 3.0 | 2.7 | 3 | 碳化钨 | 350 ~ 960 | |

表 3-31　里氏硬度计示值误差及重复性

| 冲击装置类型 | 里氏硬度值 | 示值误差 | 重复性 |
|---|---|---|---|
| D 型 | 490 ~ 830HLD | ±12HLD | 12HLD |
| DC 型 | 490 ~ 830HLDC | ±12HLDC | 12HLDC |
| G 型 | 460 ~ 630HLG | ±12HLG | 12HLG |
| C 型 | 550 ~ 890HLC | ±12HLC | 12HLC |

### 3.7.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在10～35℃的温度下进行。对于温度要求严格的试验，应控制在23℃±5℃之内。

2）试样应平稳地放在刚性支承物上，并使压头轴线与试样表面垂直，以避免试样产生位移。

3）试验过程中，硬度计应避免受到冲击和振动。

4）每个试样上的试验点数不少于4点，第1点不计。

5）在大量试验前或距前一试验超过24h，以及压头或支承台移动或重新安装后，均应进行检定，上述调整后的第一次试验结果不作为正式数据。

6）里氏硬度计不应在强烈振动、严重粉尘、腐蚀性气体或强磁场的场合使用。

7）对于需要耦合的试样，试验面应与支承台面平行，试样背面和支承台面必须平坦光滑，在耦合的平面上涂以适量的耦合剂，使试样与支承台在垂直耦合面的方向上成为承受压力的刚性整体。试验时，冲击方向必须垂直于耦合面。建议用凡士林作为耦合剂。

8）对于大面积板材、长杆、弯曲件等试样，在试验时应予适当的支承及固定，以保证冲击时不产生位移及弹动。

**2. 里氏硬度符号**

里氏硬度试验用符号及说明如表3-32所示。

**表3-32　里氏硬度试验用符号及说明**

| 符号 | 说　　明 | 符号 | 说　　明 |
|---|---|---|---|
| HLD | 用D型冲击装置测定的里氏硬度 | HLG | 用G型冲击装置测定的里氏硬度 |
| HLDC | 用DC型冲击装置测定的里氏硬度 | HLC | 用C型冲击装置测定的里氏硬度 |

注：当使用其他冲击装置时，应在HL之后附以相应型号。

**3. 试验原理**

用规定质量的冲击体在弹力作用下以一定速度冲击试样表面，用冲头在距试样表面1mm处的回弹速度与冲击速度的比值计算硬度值。计算公式为

$$HL = 1000\frac{v_R}{v_A}$$

式中　HL——里氏硬度；

$v_R$——冲击体回弹速度，单位为mm/s；

$v_A$——冲击体冲击速度，单位为mm/s。

**4. 硬度值的表示**

在里氏硬度符号HL前示出硬度数值，在HL后面示出冲击装置类型。例如：700HLD表示用D型冲击装置测定的里氏硬度值为700。对于用里氏硬度换算的其他硬度，应在里氏硬度符号之前附以相应的硬度符号。例如：400HVHLD表示用D型冲击装

置测定的里氏硬度值换算的维氏硬度值为 400。

**5. 试验程序**

1）向下推动加载套或用其他方式锁住冲击体。

2）将冲击装置支撑环紧压在试样表面上，冲击方向应与试验面垂直。

3）平稳地按动冲击装置释放钮。

4）读取硬度示值。

5）试验时冲击装置尽可能垂直向下。

6）任意两压痕中心之间距离或任一压痕中心距试样边缘距离应符合表 3-33 中的规定。

**表 3-33　压痕距离的要求**　（单位：mm）

| 冲击装置类型 | 两压痕中心间距离 ≥ | 压痕中心距试样边缘距离 ≥ |
|---|---|---|
| D、DC 型 | 3 | 5 |
| G 型 | 4 | 8 |
| C 型 | 2 | 4 |

7）试样的每个测量部位一般进行 5 次试验，数据分散不应超过平均值的 ±15HL。

8）对于其他方向冲击所测定的硬度值，如果硬度计没有修正功能，应按表 3-34 进行修正。

**表 3-34　里氏硬度修正值**

<table>
<tr><th rowspan="2">HL</th><th colspan="4">D 和 DC 型冲击装置</th><th colspan="4">G 型冲击装置</th><th colspan="4">C 型冲击装置</th></tr>
<tr><th>↘</th><th>⊣</th><th>↗</th><th>⊤</th><th>↘</th><th>⊣</th><th>↗</th><th>⊤</th><th>↘</th><th>⊣</th><th>↗</th><th>⊤</th></tr>
<tr><td>200</td><td rowspan="2">-7</td><td rowspan="2">-14</td><td rowspan="2">-23</td><td rowspan="2">-33</td><td rowspan="17">-2</td><td rowspan="17">-5</td><td rowspan="2">-13</td><td rowspan="2">-20</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="17" colspan="2">不规定</td></tr>
<tr><td>250</td></tr>
<tr><td>300</td><td>-6</td><td>-13</td><td>-22</td><td>-31</td><td>-12</td><td>-19</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>350</td><td>-6</td><td>-12</td><td>-20</td><td>-29</td><td>-12</td><td>-18</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>400</td><td>-6</td><td>-12</td><td>-19</td><td>-27</td><td>-11</td><td>-17</td><td>-7</td><td>-15</td></tr>
<tr><td>450</td><td>-5</td><td>-11</td><td>-18</td><td>-25</td><td>-11</td><td>-16</td><td>-7</td><td>-14</td></tr>
<tr><td>500</td><td>-5</td><td>-10</td><td>-17</td><td>-24</td><td>-10</td><td>-15</td><td>-7</td><td>-13</td></tr>
<tr><td>550</td><td>-5</td><td>-10</td><td>-16</td><td>-22</td><td>-9</td><td>-14</td><td>-6</td><td>-13</td></tr>
<tr><td>600</td><td>-4</td><td>-9</td><td>-15</td><td>-20</td><td>-9</td><td>-13</td><td>-6</td><td>-12</td></tr>
<tr><td>650</td><td>-4</td><td>-8</td><td>-14</td><td>-19</td><td>-8</td><td>-12</td><td>-6</td><td>-11</td></tr>
<tr><td>700</td><td>-4</td><td>-8</td><td>-13</td><td>-18</td><td>-8</td><td>-11</td><td>-5</td><td>-10</td></tr>
<tr><td>750</td><td>-3</td><td>-7</td><td>-12</td><td>-17</td><td>-7</td><td>-10</td><td>-5</td><td>-10</td></tr>
<tr><td>800</td><td>-3</td><td>-6</td><td>-11</td><td>-16</td><td>—</td><td>—</td><td>-4</td><td>-9</td></tr>
<tr><td>850</td><td>-3</td><td>-6</td><td>-10</td><td>-15</td><td>—</td><td>—</td><td>-4</td><td>-8</td></tr>
<tr><td>900</td><td>-2</td><td>-5</td><td>-9</td><td>-14</td><td>—</td><td>—</td><td>-4</td><td>-7</td></tr>
<tr><td>950</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>-3</td><td>-6</td></tr>
</table>

9）应尽量避免将里氏硬度换算成其他硬度。当必须进行换算时，对于常用金属材料，应按表 3-35 ~ 表 3-43 进行。

表 3-35　碳钢、低合金钢和铸钢（$E \approx 210000\text{MPa}$）的 D 型冲击装置里氏硬度换算表

| HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD | HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 300 | | | 83 | | | | 376 | | 68.3 | 117 | | | |
| 302 | | | 84 | | | | 378 | | 68.9 | 118 | | | |
| 304 | | | 85 | | | | 380 | | 69.5 | 119 | | | |
| 306 | | | 85 | | | | 382 | | 70.1 | 120 | | | |
| 308 | | | 86 | | | | 384 | | 70.6 | 121 | | | |
| 310 | | | 87 | | | | 386 | | 71.2 | 123 | | | |
| 312 | | | 87 | | | | 388 | | 71.8 | 124 | | | |
| 314 | | | 88 | | | | 390 | | 72.3 | 125 | | | |
| 316 | | | 89 | | | | 392 | | 72.9 | 126 | | | |
| 318 | | | 90 | | | | 394 | | 73.4 | 127 | | | |
| 320 | | | 90 | | | | 396 | | 74.0 | 129 | | | |
| 322 | | | 91 | | | | 398 | | 74.5 | 130 | | | |
| 324 | | | 92 | | | | 400 | | 75.0 | 131 | | 142 | |
| 326 | | | 93 | | | | 402 | | 75.5 | 133 | | 144 | |
| 328 | | | 94 | | | | 404 | | 76.0 | 134 | | 145 | |
| 330 | | | 94 | | | | 406 | | 76.5 | 135 | | 147 | |
| 332 | | | 95 | | | | 408 | | 77.0 | 136 | | 149 | |
| 334 | | | 96 | | | | 410 | | 77.5 | 138 | | 150 | |
| 336 | | | 97 | | | | 412 | | 78.0 | 139 | | 152 | |
| 338 | | | 98 | | | | 414 | | 78.4 | 141 | | 153 | |
| 340 | | | 99 | | | | 416 | | 78.9 | 142 | | 155 | |
| 342 | | | 100 | | | | 418 | | 79.3 | 143 | | 156 | |
| 344 | | | 101 | | | | 420 | | 79.8 | 145 | 140 | 157 | |
| 346 | | | 101 | | | | 422 | | 80.2 | 146 | 141 | 159 | |
| 348 | | | 102 | | | | 424 | | 80.7 | 148 | 143 | 160 | |
| 350 | | 59.6 | 103 | | | | 426 | | 81.1 | 149 | 144 | 162 | |
| 352 | | 60.3 | 104 | | | | 428 | | 81.5 | 151 | 145 | 163 | |
| 354 | | 61.0 | 105 | | | | 430 | | 81.9 | 152 | 147 | 165 | |
| 356 | | 61.7 | 106 | | | | 432 | | 82.4 | 154 | 148 | 166 | |
| 358 | | 62.4 | 107 | | | | 434 | | 82.8 | 155 | 150 | 168 | |
| 360 | | 63.1 | 108 | | | | 436 | | 83.2 | 157 | 151 | 169 | |
| 362 | | 63.8 | 109 | | | | 438 | | 83.6 | 158 | 153 | 171 | |
| 364 | | 64.5 | 110 | | | | 440 | | 84.0 | 160 | 154 | 172 | |
| 366 | | 65.1 | 111 | | | | 442 | | 84.4 | 161 | 156 | 174 | |
| 368 | | 65.8 | 112 | | | | 444 | | 84.8 | 163 | 157 | 175 | |
| 370 | | 66.4 | 114 | | | | 446 | | 85.1 | 164 | 159 | 176 | |
| 372 | | 67.0 | 115 | | | | 448 | | 85.5 | 166 | 160 | 178 | |
| 374 | | 67.7 | 116 | | | | 450 | | 85.9 | 168 | 162 | 179 | |

（续）

| HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD | HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 452 | | 86.3 | 169 | 164 | 181 | | 526 | 22.8 | | 239 | 231 | 239 | 35.8 |
| 454 | | 86.6 | 171 | 165 | 182 | | 528 | 23.1 | | 241 | 234 | 241 | 36.1 |
| 456 | | 87.0 | 173 | 167 | 184 | | 530 | 23.5 | | 244 | 236 | 242 | 36.4 |
| 458 | | 87.4 | 174 | 168 | 185 | | 532 | 23.8 | | 246 | 238 | 244 | 36.7 |
| 460 | | 87.7 | 176 | 170 | 187 | 26.4 | 534 | 24.1 | | 248 | 240 | 246 | 37.0 |
| 462 | | 88.1 | 178 | 172 | 188 | 26.7 | 536 | 24.5 | | 250 | 242 | 248 | 37.3 |
| 464 | | 88.5 | 179 | 173 | 190 | 27.0 | 538 | 24.8 | | 252 | 244 | 250 | 37.6 |
| 466 | | 88.8 | 181 | 175 | 191 | 27.3 | 540 | 25.2 | | 255 | 246 | 252 | 37.9 |
| 468 | | 89.2 | 183 | 177 | 193 | 27.6 | 542 | 25.5 | | 257 | 249 | 254 | 38.1 |
| 470 | | 89.5 | 185 | 178 | 194 | 27.9 | 544 | 25.8 | | 259 | 251 | 256 | 38.4 |
| 472 | | 89.9 | 186 | 180 | 196 | 28.2 | 546 | 26.2 | | 261 | 253 | 258 | 38.7 |
| 474 | | 90.3 | 188 | 182 | 197 | 28.5 | 548 | 26.5 | | 264 | 255 | 259 | 39.0 |
| 476 | | 90.6 | 190 | 184 | 198 | 28.8 | 550 | 26.8 | | 266 | 258 | 261 | 39.3 |
| 478 | | 91.0 | 192 | 185 | 200 | 29.1 | 552 | 27.1 | | 268 | 260 | 263 | 39.6 |
| 480 | | 91.3 | 194 | 187 | 202 | 29.4 | 554 | 27.5 | | 270 | 262 | 265 | 39.9 |
| 482 | | 91.7 | 195 | 189 | 203 | 29.7 | 556 | 27.8 | | 273 | 265 | 268 | 40.2 |
| 484 | | 92.1 | 197 | 191 | 205 | 30.0 | 558 | 28.1 | | 275 | 267 | 270 | 40.5 |
| 486 | | 92.4 | 199 | 192 | 206 | 30.3 | 560 | 28.4 | | 278 | 269 | 272 | 40.8 |
| 488 | | 92.8 | 201 | 194 | 208 | 30.6 | 562 | 28.8 | | 280 | 272 | 274 | 41.1 |
| 490 | | 93.1 | 203 | 196 | 209 | 30.9 | 564 | 29.1 | | 282 | 274 | 276 | 41.4 |
| 492 | | 93.5 | 205 | 198 | 211 | 31.2 | 566 | 29.4 | | 285 | 276 | 278 | 41.7 |
| 494 | | 93.9 | 207 | 200 | 212 | 31.5 | 568 | 29.7 | | 287 | 279 | 280 | 42.0 |
| 496 | | 94.3 | 209 | 202 | 214 | 31.7 | 570 | 30.0 | | 290 | 281 | 282 | 42.3 |
| 498 | | 94.6 | 211 | 204 | 215 | 32.0 | 572 | 30.3 | | 292 | 283 | 285 | 42.6 |
| 500 | | 95.0 | 213 | 205 | 217 | 32.2 | 574 | 30.6 | | 294 | 286 | 287 | 42.9 |
| 502 | | 95.4 | 215 | 207 | 219 | 32.5 | 576 | 30.9 | | 297 | 288 | 289 | 43.2 |
| 504 | | 95.8 | 217 | 209 | 220 | 32.8 | 578 | 31.2 | | 299 | 291 | 292 | 43.5 |
| 506 | | 96.2 | 219 | 211 | 222 | 33.1 | 580 | 31.5 | | 302 | 293 | 294 | 43.8 |
| 508 | | 96.6 | 221 | 213 | 224 | 33.3 | 582 | 31.8 | | 304 | 296 | 296 | 44.1 |
| 510 | 19.8 | 97.0 | 223 | 215 | 225 | 33.6 | 584 | 32.1 | | 307 | 298 | 299 | 44.4 |
| 512 | 20.2 | 97.4 | 225 | 217 | 227 | 33.9 | 586 | 32.4 | | 309 | 301 | 301 | 44.7 |
| 514 | 20.6 | 97.9 | 227 | 219 | 229 | 34.2 | 588 | 32.7 | | 312 | 303 | 304 | 45.0 |
| 516 | 21.0 | 98.3 | 229 | 221 | 230 | 34.4 | 590 | 33.0 | | 315 | 306 | 308 | 45.4 |
| 518 | 21.3 | 98.7 | 231 | 223 | 232 | 34.7 | 592 | 33.3 | | 317 | 308 | 310 | 45.7 |
| 520 | 21.7 | 99.2 | 233 | 225 | 234 | 35.0 | 594 | 33.6 | | 320 | 311 | 313 | 46.0 |
| 522 | 22.0 | 99.6 | 235 | 227 | 235 | 35.3 | 596 | 33.9 | | 322 | 314 | 315 | 46.3 |
| 524 | 22.4 | | 237 | 229 | 237 | 35.6 | 598 | 34.2 | | 325 | 316 | 318 | 46.6 |

（续）

| HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD | HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 600 | 34.5 | | 328 | 319 | 320 | 46.9 | 676 | 44.9 | | 439 | 429 | 429 | 59.2 |
| 602 | 34.8 | | 330 | 322 | 323 | 47.2 | 678 | 45.2 | | 442 | 432 | 432 | 59.5 |
| 604 | 35.1 | | 333 | 324 | 325 | 47.5 | 680 | 45.5 | | 446 | 435 | 435 | 59.9 |
| 606 | 35.4 | | 336 | 327 | 328 | 47.8 | 682 | 45.7 | | 449 | 439 | 439 | 60.2 |
| 608 | 35.7 | | 338 | 330 | 331 | 48.2 | 684 | 46.0 | | 452 | 442 | 442 | 60.5 |
| 610 | 35.9 | | 341 | 332 | 333 | 48.5 | 686 | 46.2 | | 456 | 445 | 445 | 60.9 |
| 612 | 36.2 | | 344 | 335 | 336 | 48.2 | 688 | 46.5 | | 459 | 448 | 448 | 61.2 |
| 614 | 36.5 | | 346 | 338 | 339 | 49.1 | 690 | 46.8 | | 463 | 451 | 451 | 61.6 |
| 616 | 36.8 | | 349 | 340 | 341 | 49.4 | 692 | 47.0 | | 466 | 455 | 455 | 61.9 |
| 618 | 37.1 | | 352 | 343 | 344 | 49.7 | 694 | 47.3 | | 469 | 458 | 458 | 62.2 |
| 620 | 37.4 | | 355 | 346 | 346 | 50.1 | 696 | 47.5 | | 473 | 461 | 461 | 62.6 |
| 622 | 37.6 | | 357 | 349 | 349 | 50.4 | 698 | 47.8 | | 476 | 465 | 465 | 62.9 |
| 624 | 37.9 | | 360 | 351 | 352 | 50.7 | 700 | 48.0 | | 480 | 468 | 468 | 63.3 |
| 626 | 38.2 | | 363 | 354 | 355 | 51.0 | 702 | 48.3 | | 483 | 471 | 471 | 63.6 |
| 628 | 38.5 | | 366 | 357 | 357 | 51.3 | 704 | 48.6 | | 487 | 474 | 474 | 64.0 |
| 630 | 38.7 | | 369 | 360 | 360 | 51.7 | 706 | 48.8 | | 491 | 478 | 478 | 64.3 |
| 632 | 39.0 | | 372 | 363 | 363 | 52.0 | 708 | 49.1 | | 494 | 481 | 481 | 64.6 |
| 634 | 39.3 | | 375 | 366 | 366 | 52.3 | 710 | 49.3 | | 498 | 485 | 485 | 65.0 |
| 636 | 39.6 | | 377 | 369 | 369 | 52.6 | 712 | 49.6 | | 501 | 488 | 488 | 65.3 |
| 638 | 39.8 | | 380 | 371 | 371 | 52.9 | 714 | 49.8 | | 505 | 491 | 491 | 65.7 |
| 640 | 40.1 | | 383 | 374 | 374 | 53.3 | 716 | 50.1 | | 509 | 495 | 495 | 66.0 |
| 642 | 40.4 | | 386 | 377 | 377 | 53.6 | 718 | 50.3 | | 513 | 498 | 498 | 66.4 |
| 644 | 40.7 | | 389 | 380 | 380 | 53.9 | 720 | 50.6 | | 516 | 502 | 502 | 66.7 |
| 646 | 40.9 | | 392 | 383 | 383 | 54.2 | 722 | 50.8 | | 520 | 505 | 505 | 67.1 |
| 648 | 41.2 | | 395 | 386 | 386 | 54.6 | 724 | 51.1 | | 524 | 508 | 508 | 67.4 |
| 650 | 41.5 | | 398 | 389 | 389 | 54.9 | 726 | 51.3 | | 528 | 512 | 512 | 67.8 |
| 652 | 41.7 | | 401 | 392 | 392 | 55.2 | 728 | 51.6 | | 532 | 515 | 515 | 68.2 |
| 654 | 42.0 | | 404 | 395 | 395 | 55.6 | 730 | 51.8 | | 535 | 519 | 519 | 68.5 |
| 656 | 42.3 | | 407 | 398 | 398 | 55.8 | 732 | 52.1 | | 539 | 522 | 522 | 68.9 |
| 658 | 42.6 | | 411 | 401 | 401 | 56.2 | 734 | 52.3 | | 543 | 526 | 526 | 69.2 |
| 660 | 42.8 | | 414 | 404 | 404 | 56.5 | 736 | 52.6 | | 547 | 529 | 529 | 69.6 |
| 662 | 43.1 | | 417 | 407 | 407 | 56.9 | 738 | 52.8 | | 551 | 533 | 533 | 69.9 |
| 664 | 43.4 | | 420 | 410 | 410 | 57.2 | 740 | 53.1 | | 555 | 536 | 536 | 70.3 |
| 666 | 43.6 | | 423 | 413 | 413 | 57.5 | 742 | 53.3 | | 559 | 540 | 540 | 70.7 |
| 668 | 43.9 | | 426 | 417 | 417 | 57.9 | 744 | 53.6 | | 563 | 543 | 543 | 71.0 |
| 670 | 44.1 | | 429 | 420 | 420 | 58.2 | 746 | 53.8 | | 568 | 547 | 547 | 71.4 |
| 672 | 44.4 | | 433 | 423 | 423 | 58.5 | 748 | 54.1 | | 572 | 551 | 551 | 71.8 |
| 674 | 44.7 | | 436 | 426 | 426 | 58.9 | 750 | 54.3 | | 576 | 554 | 554 | 72.1 |

（续）

| HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD | HLD | HRC | HRB | HV | HBW[1]（$F=30D^2$） | HBW[2]（$F=30D^2$） | HSD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 752 | 54.5 | | 580 | 558 | 558 | 72.5 | 822 | 62.5 | | 750 | | | 86.1 |
| 754 | 54.8 | | 584 | 561 | 561 | 72.9 | 824 | 62.7 | | 756 | | | 86.5 |
| 756 | 55.0 | | 589 | 565 | 565 | 73.2 | 826 | 62.9 | | 762 | | | 87.0 |
| 758 | 55.3 | | 593 | 569 | 569 | 73.6 | 828 | 63.1 | | 768 | | | 87.4 |
| 760 | 55.5 | | 597 | 572 | 572 | 74.0 | 830 | 63.3 | | 773 | | | 87.8 |
| 762 | 55.7 | | 602 | 576 | 576 | 74.3 | 832 | 63.5 | | 779 | | | 88.2 |
| 764 | 56.0 | | 606 | 580 | 580 | 74.7 | 834 | 63.7 | | 785 | | | 88.6 |
| 766 | 56.2 | | 610 | 583 | 583 | 75.1 | 836 | 63.9 | | 791 | | | 89.1 |
| 768 | 56.5 | | 615 | 587 | 587 | 75.5 | 838 | 64.1 | | 797 | | | 89.5 |
| 770 | 56.7 | | 619 | 591 | 591 | 75.8 | 840 | 64.3 | | 803 | | | 89.9 |
| 772 | 56.9 | | 624 | 594 | 594 | 76.2 | 842 | 64.5 | | 809 | | | 90.4 |
| 774 | 57.2 | | 628 | 598 | 598 | 76.6 | 844 | 64.7 | | 816 | | | 90.8 |
| 776 | 57.4 | | 633 | 602 | 602 | 77.0 | 846 | 64.9 | | 822 | | | 91.2 |
| 778 | 57.6 | | 638 | 605 | 605 | 77.4 | 848 | 65.1 | | 828 | | | 91.7 |
| 780 | 57.9 | | 642 | 609 | 609 | 77.7 | 850 | 65.3 | | 835 | | | 92.1 |
| 782 | 58.1 | | 647 | 613 | 613 | 78.1 | 852 | 65.4 | | 841 | | | 92.6 |
| 784 | 58.3 | | 652 | 617 | 617 | 78.5 | 854 | 65.6 | | 848 | | | 93.0 |
| 786 | 58.6 | | 657 | 620 | 620 | 78.9 | 856 | 65.8 | | 854 | | | 93.5 |
| 788 | 58.8 | | 662 | 624 | 624 | 79.3 | 858 | 66.0 | | 861 | | | 93.9 |
| 790 | 59.0 | | 666 | 628 | 628 | 79.7 | 860 | 66.2 | | 867 | | | 94.4 |
| 792 | 59.2 | | 671 | 632 | 632 | 80.1 | 862 | 66.3 | | 874 | | | 94.8 |
| 794 | 59.5 | | 676 | 635 | 635 | 80.5 | 864 | 66.5 | | 881 | | | 95.3 |
| 796 | 59.7 | | 681 | 639 | 639 | 80.9 | 866 | 66.7 | | 888 | | | 95.7 |
| 798 | 59.9 | | 686 | 643 | 643 | 81.2 | 868 | 66.8 | | 895 | | | 96.2 |
| 800 | 60.1 | | 691 | 647 | 647 | 81.6 | 870 | 67.0 | | 902 | | | 96.7 |
| 802 | 60.4 | | 697 | 651 | 651 | 82.0 | 872 | 67.2 | | 909 | | | 97.1 |
| 804 | 60.6 | | 702 | | | 82.4 | 874 | 67.3 | | 916 | | | 97.6 |
| 806 | 60.8 | | 707 | | | 82.8 | 876 | 67.5 | | 923 | | | 98.1 |
| 808 | 61.0 | | 712 | | | 83.2 | 878 | 67.6 | | 931 | | | 98.6 |
| 810 | 61.2 | | 718 | | | 83.7 | 880 | 67.8 | | 938 | | | 99.0 |
| 812 | 61.4 | | 723 | | | 84.1 | 882 | 68.0 | | 946 | | | 99.5 |
| 814 | 61.7 | | 728 | | | 84.5 | 884 | 68.1 | | 953 | | | |
| 816 | 61.9 | | 734 | | | 84.9 | 886 | 68.2 | | 961 | | | |
| 818 | 62.1 | | 739 | | | 85.3 | 888 | 68.4 | | 968 | | | |
| 820 | 62.3 | | 745 | | | 85.7 | 890 | 68.5 | | 976 | | | |

注：HBW［1］为轧制材料的布氏硬度，HBW［2］为锻造材料的布氏硬度。

**表 3-36　铸铁的 D 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLD | 灰铸铁 HBW ( $F=30D^2$ ) | 球墨铸铁 HBW ( $F=30D^2$ ) | HLD | 灰铸铁 HBW ( $F=30D^2$ ) | 球墨铸铁 HBW ( $F=30D^2$ ) | HLD | 灰铸铁 HBW ( $F=30D^2$ ) | 球墨铸铁 HBW ( $F=30D^2$ ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 416 | | 140 | 490 | 179 | 194 | 564 | 245 | 266 |
| 418 | | 142 | 492 | 181 | 195 | 566 | 247 | 268 |
| 420 | | 143 | 494 | 182 | 197 | 568 | 249 | 271 |
| 422 | | 144 | 496 | 184 | 199 | 570 | 251 | 273 |
| 424 | | 145 | 498 | 186 | 201 | 572 | 253 | 275 |
| 426 | | 146 | 500 | 188 | 202 | 574 | 255 | 277 |
| 428 | | 148 | 502 | 189 | 204 | 576 | 257 | 280 |
| 430 | | 149 | 504 | 191 | 205 | 578 | 259 | 282 |
| 432 | | 150 | 506 | 193 | 208 | 580 | 261 | 284 |
| 434 | | 152 | 508 | 194 | 210 | 582 | 263 | 286 |
| 436 | | 153 | 510 | 196 | 211 | 584 | 265 | 289 |
| 438 | | 154 | 512 | 198 | 213 | 586 | 266 | 291 |
| 440 | 140 | 156 | 514 | 200 | 215 | 588 | 268 | 293 |
| 442 | 141 | 157 | 516 | 201 | 217 | 590 | 270 | 296 |
| 444 | 143 | 158 | 518 | 203 | 219 | 592 | 272 | 298 |
| 446 | 144 | 160 | 520 | 205 | 221 | 594 | 274 | 301 |
| 448 | 146 | 161 | 522 | 207 | 223 | 596 | 276 | 303 |
| 450 | 147 | 162 | 524 | 208 | 225 | 598 | 278 | 305 |
| 452 | 149 | 164 | 526 | 210 | 227 | 600 | 280 | 308 |
| 454 | 150 | 165 | 528 | 212 | 229 | 602 | 283 | 310 |
| 456 | 152 | 167 | 530 | 214 | 230 | 604 | 285 | 313 |
| 458 | 153 | 168 | 532 | 216 | 232 | 606 | 287 | 315 |
| 460 | 155 | 170 | 534 | 217 | 234 | 608 | 289 | 318 |
| 462 | 156 | 171 | 536 | 219 | 236 | 610 | 291 | 320 |
| 464 | 158 | 173 | 538 | 221 | 239 | 612 | 293 | 323 |
| 466 | 160 | 174 | 540 | 223 | 241 | 614 | 295 | 325 |
| 468 | 161 | 176 | 542 | 225 | 243 | 616 | 297 | 328 |
| 470 | 163 | 177 | 544 | 227 | 245 | 618 | 299 | 330 |
| 472 | 164 | 179 | 546 | 228 | 247 | 620 | 301 | 333 |
| 474 | 166 | 181 | 548 | 230 | 249 | 622 | 303 | 336 |
| 476 | 168 | 182 | 550 | 232 | 251 | 624 | 305 | 338 |
| 478 | 169 | 184 | 552 | 234 | 253 | 626 | 308 | 341 |
| 480 | 171 | 185 | 554 | 236 | 255 | 628 | 310 | 343 |
| 482 | 172 | 187 | 556 | 238 | 257 | 630 | 312 | 346 |
| 484 | 174 | 189 | 558 | 240 | 260 | 632 | 314 | 349 |
| 486 | 176 | 190 | 560 | 241 | 262 | 634 | 316 | 351 |
| 488 | 177 | 192 | 562 | 243 | 264 | 636 | 318 | 354 |

（续）

| HLD | 灰铸铁 HBW（$F=30D^2$） | 球墨铸铁 HBW（$F=30D^2$） | HLD | 灰铸铁 HBW（$F=30D^2$） | 球墨铸铁 HBW（$F=30D^2$） | HLD | 灰铸铁 HBW（$F=30D^2$） | 球墨铸铁 HBW（$F=30D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 638 | 321 | 357 | 646 | 330 | 368 | 654 | | 379 |
| 640 | 323 | 359 | 648 | 332 | 370 | 656 | | 381 |
| 642 | 325 | 362 | 650 | 334 | 373 | 658 | | 384 |
| 644 | 327 | 365 | 652 | | 376 | 660 | | 387 |

注：本表适用于：未经热处理的非合金及低合金灰铸铁（GG）、非合金及低合金球墨铸铁（GGG）。

**表 3-37　铸铝合金（$E\approx65000\sim85000$MPa）的 D 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 30 | 254 | 43 | 308 | 59 | 362 | 77 |
| 202 | 31 | 256 | 44 | 310 | 60 | 364 | 77 |
| 204 | 31 | 258 | 44 | 312 | 60 | 366 | 78 |
| 206 | 32 | 260 | 45 | 314 | 61 | 368 | 79 |
| 208 | 32 | 262 | 46 | 316 | 61 | 370 | 79 |
| 210 | 33 | 264 | 46 | 318 | 62 | 372 | 80 |
| 212 | 33 | 266 | 47 | 320 | 63 | 374 | 81 |
| 214 | 34 | 268 | 47 | 322 | 63 | 376 | 82 |
| 216 | 34 | 270 | 48 | 324 | 64 | 378 | 82 |
| 218 | 34 | 272 | 48 | 326 | 65 | 380 | 83 |
| 220 | 35 | 274 | 49 | 328 | 65 | 382 | 84 |
| 222 | 35 | 276 | 49 | 330 | 66 | 384 | 84 |
| 224 | 36 | 278 | 50 | 332 | 67 | 386 | 85 |
| 226 | 36 | 280 | 51 | 334 | 67 | 388 | 86 |
| 228 | 37 | 282 | 51 | 336 | 68 | 390 | 87 |
| 230 | 37 | 284 | 52 | 338 | 69 | 392 | 87 |
| 232 | 38 | 286 | 52 | 340 | 69 | 394 | 88 |
| 234 | 38 | 288 | 53 | 342 | 70 | 396 | 89 |
| 236 | 39 | 290 | 54 | 344 | 71 | 398 | 90 |
| 238 | 39 | 292 | 54 | 346 | 71 | 400 | 90 |
| 240 | 40 | 294 | 55 | 348 | 72 | 402 | 91 |
| 242 | 40 | 296 | 55 | 350 | 73 | 404 | 92 |
| 244 | 41 | 298 | 56 | 352 | 73 | 406 | 93 |
| 246 | 41 | 300 | 56 | 354 | 74 | 408 | 93 |
| 248 | 42 | 302 | 57 | 356 | 75 | 410 | 94 |
| 250 | 42 | 304 | 58 | 358 | 75 | 412 | 95 |
| 252 | 43 | 306 | 58 | 360 | 76 | 414 | 96 |

（续）

| HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 416 | 96 | 454 | 112 | 492 | 128 | 530 | 145 |
| 418 | 97 | 456 | 112 | 494 | 128 | 532 | 145 |
| 420 | 98 | 458 | 113 | 496 | 129 | 534 | 146 |
| 422 | 99 | 460 | 114 | 498 | 130 | 536 | 147 |
| 424 | 100 | 462 | 115 | 500 | 131 | 538 | 148 |
| 426 | 100 | 464 | 116 | 502 | 132 | 540 | 149 |
| 428 | 101 | 466 | 116 | 504 | 133 | 542 | 150 |
| 430 | 102 | 468 | 117 | 506 | 134 | 544 | 151 |
| 432 | 103 | 470 | 118 | 508 | 135 | 546 | 152 |
| 434 | 103 | 472 | 119 | 510 | 135 | 548 | 153 |
| 436 | 104 | 474 | 120 | 512 | 136 | 550 | 154 |
| 438 | 105 | 476 | 121 | 514 | 137 | 552 | 155 |
| 440 | 106 | 478 | 122 | 516 | 138 | 554 | 156 |
| 442 | 107 | 480 | 122 | 518 | 139 | 556 | 157 |
| 444 | 107 | 482 | 123 | 520 | 140 | 558 | 158 |
| 446 | 108 | 484 | 124 | 522 | 141 | 560 | 159 |
| 448 | 109 | 486 | 125 | 524 | 142 | | |
| 450 | 110 | 488 | 126 | 526 | 143 | | |
| 452 | 111 | 490 | 127 | 528 | 144 | | |

**表 3-38　铜锌合金（$E\approx85000\sim130000$MPa）的 D 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLD | HBW（$F=10D^2$） | HRB | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HRB | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HRB | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HRB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 40 | | 232 | 48 | | 264 | 58 | 15.8 | 296 | 68 | 32.0 |
| 202 | 40 | | 234 | 49 | | 266 | 58 | 16.9 | 298 | 68 | 32.9 |
| 204 | 41 | | 236 | 50 | | 268 | 59 | 18.0 | 300 | 69 | 33.8 |
| 206 | 41 | | 238 | 50 | | 270 | 60 | 19.1 | 302 | 70 | 34.7 |
| 208 | 42 | | 240 | 51 | | 272 | 60 | 20.2 | 304 | 70 | 35.5 |
| 210 | 42 | | 242 | 51 | | 274 | 61 | 21.2 | 306 | 71 | 36.4 |
| 212 | 43 | | 244 | 52 | | 276 | 61 | 22.3 | 308 | 72 | 37.2 |
| 214 | 43 | | 246 | 52 | | 278 | 62 | 23.3 | 310 | 72 | 38.1 |
| 216 | 44 | | 248 | 53 | | 280 | 63 | 24.3 | 312 | 73 | 38.9 |
| 218 | 45 | | 250 | 54 | | 282 | 63 | 25.3 | 314 | 74 | 39.7 |
| 220 | 45 | | 252 | 54 | | 284 | 64 | 26.3 | 316 | 74 | 40.5 |
| 222 | 46 | | 254 | 55 | | 286 | 65 | 27.3 | 318 | 75 | 41.3 |
| 224 | 46 | | 256 | 55 | | 288 | 65 | 28.2 | 320 | 76 | 42.1 |
| 226 | 47 | | 258 | 56 | | 290 | 66 | 29.2 | 322 | 76 | 42.9 |
| 228 | 47 | | 260 | 57 | 13.5 | 292 | 66 | 30.1 | 324 | 77 | 43.6 |
| 230 | 48 | | 262 | 57 | 14.7 | 294 | 67 | 31.1 | 326 | 78 | 44.4 |

（续）

| HLD | HBW ($F=10D^2$) | HRB | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HRB | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HRB | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HRB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 328 | 78 | 45.1 | 384 | 99 | 62.7 | 440 | 121 | 75.6 | 496 | 146 | 86.0 |
| 330 | 79 | 45.9 | 386 | 99 | 63.2 | 442 | 122 | 76.0 | 498 | 147 | 86.4 |
| 332 | 80 | 46.6 | 388 | 100 | 63.7 | 444 | 123 | 76.4 | 500 | 148 | 86.7 |
| 334 | 80 | 47.3 | 390 | 101 | 64.2 | 446 | 124 | 76.8 | 502 | 149 | 87.1 |
| 336 | 81 | 48.0 | 392 | 102 | 64.7 | 448 | 125 | 77.2 | 504 | 150 | 87.4 |
| 338 | 82 | 48.7 | 394 | 102 | 65.2 | 450 | 126 | 77.6 | 506 | 151 | 87.8 |
| 340 | 82 | 49.4 | 396 | 103 | 65.7 | 452 | 126 | 77.9 | 508 | 152 | 88.1 |
| 342 | 83 | 50.1 | 398 | 104 | 66.2 | 454 | 127 | 78.3 | 510 | 153 | 88.4 |
| 344 | 84 | 50.8 | 400 | 105 | 66.7 | 456 | 128 | 78.7 | 512 | 154 | 88.8 |
| 346 | 85 | 51.4 | 402 | 106 | 67.2 | 458 | 129 | 79.1 | 514 | 155 | 89.1 |
| 348 | 85 | 52.1 | 404 | 106 | 67.7 | 460 | 130 | 79.5 | 516 | 156 | 89.5 |
| 350 | 86 | 52.7 | 406 | 107 | 68.2 | 462 | 131 | 79.9 | 518 | 157 | 89.8 |
| 352 | 87 | 53.4 | 408 | 108 | 68.6 | 464 | 132 | 80.2 | 520 | 158 | 90.2 |
| 354 | 87 | 54.0 | 410 | 109 | 69.1 | 466 | 133 | 80.6 | 522 | 159 | 90.5 |
| 356 | 88 | 54.6 | 412 | 110 | 69.5 | 468 | 133 | 81.0 | 524 | 160 | 90.8 |
| 358 | 89 | 55.3 | 414 | 110 | 70.0 | 470 | 134 | 81.3 | 526 | 161 | 91.2 |
| 360 | 90 | 55.9 | 416 | 111 | 70.4 | 472 | 135 | 81.7 | 528 | 162 | 91.5 |
| 362 | 90 | 56.5 | 418 | 112 | 70.9 | 474 | 136 | 82.1 | 530 | 163 | 91.9 |
| 364 | 91 | 57.1 | 420 | 113 | 71.3 | 476 | 137 | 82.4 | 532 | 164 | 92.2 |
| 366 | 92 | 57.7 | 422 | 114 | 71.8 | 478 | 138 | 82.8 | 534 | 165 | 92.5 |
| 368 | 93 | 58.2 | 424 | 114 | 72.2 | 480 | 139 | 83.2 | 536 | 166 | 92.9 |
| 370 | 93 | 58.8 | 426 | 115 | 72.6 | 482 | 140 | 83.5 | 538 | 167 | 93.2 |
| 372 | 94 | 59.4 | 428 | 116 | 73.1 | 484 | 141 | 83.9 | 540 | 168 | 93.6 |
| 374 | 95 | 60.0 | 430 | 117 | 73.5 | 486 | 142 | 84.2 | 542 | 169 | 93.9 |
| 376 | 96 | 60.5 | 432 | 118 | 73.9 | 488 | 143 | 84.6 | 544 | 170 | 94.2 |
| 378 | 96 | 61.1 | 434 | 119 | 74.3 | 490 | 144 | 85.0 | 546 | 171 | 94.6 |
| 380 | 97 | 61.6 | 436 | 120 | 74.7 | 492 | 144 | 85.3 | 548 | 172 | 94.9 |
| 382 | 98 | 62.1 | 438 | 120 | 75.2 | 494 | 145 | 85.7 | 550 | 173 | 95.3 |

**表 3-39　铜铝合金及铜锡合金（$E \approx 94000 \sim 130000$MPa）的 D 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLD | HBW ($F=10D^2$) | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HLD | HBW ($F=10D^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 300 | 60 | 310 | 64 | 320 | 68 | 330 | 73 |
| 302 | 61 | 312 | 65 | 322 | 69 | 332 | 73 |
| 304 | 62 | 314 | 66 | 324 | 70 | 334 | 74 |
| 306 | 62 | 316 | 67 | 326 | 71 | 336 | 75 |
| 308 | 63 | 318 | 67 | 328 | 72 | 338 | 76 |

（续）

| HLD | HBW ($F=10D^2$) | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HLD | HBW ($F=10D^2$) | HLD | HBW ($F=10D^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 340 | 77 | 418 | 115 | 496 | 159 | 574 | 206 |
| 342 | 78 | 420 | 116 | 498 | 160 | 576 | 207 |
| 344 | 79 | 422 | 117 | 500 | 161 | 578 | 208 |
| 346 | 80 | 424 | 119 | 502 | 162 | 580 | 209 |
| 348 | 81 | 426 | 120 | 504 | 163 | 582 | 211 |
| 350 | 82 | 428 | 121 | 506 | 164 | 584 | 212 |
| 352 | 82 | 430 | 122 | 508 | 166 | 586 | 213 |
| 354 | 83 | 432 | 123 | 510 | 167 | 588 | 214 |
| 356 | 84 | 434 | 124 | 512 | 168 | 590 | 216 |
| 358 | 85 | 436 | 125 | 514 | 169 | 592 | 217 |
| 360 | 86 | 438 | 126 | 516 | 170 | 594 | 218 |
| 362 | 87 | 440 | 127 | 518 | 172 | 596 | 219 |
| 364 | 88 | 442 | 128 | 520 | 173 | 598 | 221 |
| 366 | 89 | 444 | 129 | 522 | 174 | 600 | 222 |
| 368 | 90 | 446 | 130 | 524 | 175 | 602 | 223 |
| 370 | 91 | 448 | 132 | 526 | 176 | 604 | 225 |
| 372 | 92 | 450 | 133 | 528 | 178 | 606 | 226 |
| 374 | 93 | 452 | 134 | 530 | 179 | 608 | 227 |
| 376 | 94 | 454 | 135 | 532 | 180 | 610 | 228 |
| 378 | 95 | 456 | 136 | 534 | 181 | 612 | 230 |
| 380 | 96 | 458 | 137 | 536 | 182 | 614 | 231 |
| 382 | 97 | 460 | 138 | 538 | 184 | 616 | 232 |
| 384 | 98 | 462 | 139 | 540 | 185 | 618 | 234 |
| 386 | 99 | 464 | 140 | 542 | 186 | 620 | 235 |
| 388 | 100 | 466 | 142 | 544 | 187 | 622 | 236 |
| 390 | 101 | 468 | 143 | 546 | 188 | 624 | 238 |
| 392 | 102 | 470 | 144 | 548 | 190 | 626 | 239 |
| 394 | 103 | 472 | 145 | 550 | 191 | 628 | 240 |
| 396 | 104 | 474 | 146 | 552 | 192 | 630 | 242 |
| 398 | 105 | 476 | 147 | 554 | 193 | 632 | 243 |
| 400 | 106 | 478 | 148 | 556 | 194 | 634 | 244 |
| 402 | 107 | 480 | 149 | 558 | 196 | 636 | 246 |
| 404 | 108 | 482 | 151 | 560 | 197 | 638 | 247 |
| 406 | 109 | 484 | 152 | 562 | 198 | 640 | 248 |
| 408 | 110 | 486 | 153 | 564 | 199 | 642 | 250 |
| 410 | 111 | 488 | 154 | 566 | 201 | 644 | 251 |
| 412 | 112 | 490 | 155 | 568 | 202 | 646 | 252 |
| 414 | 113 | 492 | 156 | 570 | 203 | 648 | 254 |
| 416 | 114 | 494 | 158 | 572 | 204 | 650 | 255 |

（续）

| HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 652 | 256 | 666 | 266 | 680 | 276 | 694 | 286 |
| 654 | 258 | 668 | 267 | 682 | 277 | 696 | 287 |
| 656 | 259 | 670 | 269 | 684 | 278 | 698 | 289 |
| 658 | 260 | 672 | 270 | 686 | 280 | 700 | 290 |
| 660 | 262 | 674 | 271 | 688 | 281 | | |
| 662 | 263 | 676 | 273 | 690 | 283 | | |
| 664 | 264 | 678 | 274 | 692 | 284 | | |

**表 3-40　纯铜及低铜合金（$E\approx 110000\sim 135000$MPa）的 D 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 45 | 254 | 59 | 308 | 77 | 362 | 100 | 416 | 126 |
| 202 | 45 | 256 | 60 | 310 | 78 | 364 | 101 | 418 | 127 |
| 204 | 46 | 258 | 60 | 312 | 79 | 366 | 102 | 420 | 128 |
| 206 | 46 | 260 | 61 | 314 | 80 | 368 | 103 | 422 | 129 |
| 208 | 47 | 262 | 61 | 316 | 80 | 370 | 103 | 424 | 131 |
| 210 | 47 | 264 | 62 | 318 | 81 | 372 | 104 | 426 | 132 |
| 212 | 48 | 266 | 63 | 320 | 82 | 374 | 105 | 428 | 133 |
| 214 | 48 | 268 | 63 | 322 | 83 | 376 | 106 | 430 | 134 |
| 216 | 49 | 270 | 64 | 324 | 84 | 378 | 107 | 432 | 135 |
| 218 | 49 | 272 | 65 | 326 | 84 | 380 | 108 | 434 | 136 |
| 220 | 50 | 274 | 65 | 328 | 85 | 382 | 109 | 436 | 137 |
| 222 | 50 | 276 | 66 | 330 | 86 | 384 | 110 | 438 | 138 |
| 224 | 51 | 278 | 67 | 332 | 87 | 386 | 111 | 440 | 139 |
| 226 | 51 | 280 | 67 | 334 | 88 | 388 | 112 | 442 | 140 |
| 228 | 52 | 282 | 68 | 336 | 88 | 390 | 113 | 444 | 142 |
| 230 | 52 | 284 | 69 | 338 | 89 | 392 | 114 | 446 | 143 |
| 232 | 53 | 286 | 69 | 340 | 90 | 394 | 115 | 448 | 144 |
| 234 | 53 | 288 | 70 | 342 | 91 | 396 | 116 | 450 | 145 |
| 236 | 54 | 290 | 71 | 344 | 92 | 398 | 117 | 452 | 146 |
| 238 | 54 | 292 | 71 | 346 | 93 | 400 | 118 | 454 | 147 |
| 240 | 55 | 294 | 72 | 348 | 94 | 402 | 119 | 456 | 148 |
| 242 | 56 | 296 | 73 | 350 | 94 | 404 | 120 | 458 | 150 |
| 244 | 56 | 298 | 74 | 352 | 95 | 406 | 121 | 460 | 151 |
| 246 | 57 | 300 | 74 | 354 | 96 | 408 | 122 | 462 | 152 |
| 248 | 57 | 302 | 75 | 356 | 97 | 410 | 123 | 464 | 153 |
| 250 | 58 | 304 | 76 | 358 | 98 | 412 | 124 | 466 | 154 |
| 252 | 58 | 306 | 77 | 360 | 99 | 414 | 125 | 468 | 155 |

（续）

| HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） | HLD | HBW（$F=10D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 470 | 157 | 516 | 185 | 562 | 216 | 608 | 250 | 654 | 286 |
| 472 | 158 | 518 | 187 | 564 | 218 | 610 | 252 | 656 | 287 |
| 474 | 159 | 520 | 188 | 566 | 219 | 612 | 253 | 658 | 289 |
| 476 | 160 | 522 | 189 | 568 | 221 | 614 | 255 | 660 | 290 |
| 478 | 161 | 524 | 191 | 570 | 222 | 616 | 256 | 662 | 292 |
| 480 | 163 | 526 | 192 | 572 | 224 | 618 | 258 | 664 | 294 |
| 482 | 164 | 528 | 193 | 574 | 225 | 620 | 259 | 666 | 295 |
| 484 | 165 | 530 | 195 | 576 | 226 | 622 | 261 | 668 | 297 |
| 486 | 166 | 532 | 196 | 578 | 228 | 624 | 262 | 670 | 299 |
| 488 | 168 | 534 | 197 | 580 | 229 | 626 | 264 | 672 | 300 |
| 490 | 169 | 536 | 199 | 582 | 231 | 628 | 265 | 674 | 302 |
| 492 | 170 | 538 | 200 | 584 | 232 | 630 | 267 | 676 | 303 |
| 494 | 171 | 540 | 201 | 586 | 234 | 632 | 268 | 678 | 305 |
| 496 | 172 | 542 | 203 | 588 | 235 | 634 | 270 | 680 | 307 |
| 498 | 174 | 544 | 204 | 590 | 237 | 636 | 271 | 682 | 308 |
| 500 | 175 | 546 | 205 | 592 | 238 | 638 | 273 | 684 | 310 |
| 502 | 176 | 548 | 207 | 594 | 240 | 640 | 275 | 686 | 312 |
| 504 | 178 | 550 | 208 | 596 | 241 | 642 | 276 | 688 | 313 |
| 506 | 179 | 552 | 209 | 598 | 243 | 644 | 278 | 690 | 315 |
| 508 | 180 | 554 | 211 | 600 | 244 | 646 | 279 | | |
| 510 | 181 | 556 | 212 | 602 | 245 | 648 | 281 | | |
| 512 | 183 | 558 | 214 | 604 | 247 | 650 | 282 | | |
| 514 | 184 | 560 | 215 | 606 | 248 | 652 | 284 | | |

**表 3-41　低碳钢、低合金钢及铸钢（$E \approx 210000\text{MPa}$）的 G 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 300 | 90 | 47.7 | 316 | 100 | 54.8 | 332 | 109 | 61.3 | 348 | 120 | 67.3 | 364 | 131 | 72.6 |
| 302 | 91 | 48.6 | 318 | 101 | 55.7 | 334 | 111 | 62.1 | 350 | 121 | 68 | 366 | 132 | 73.3 |
| 304 | 93 | 49.5 | 320 | 102 | 56.5 | 336 | 112 | 62.9 | 352 | 123 | 68.7 | 368 | 134 | 73.9 |
| 306 | 94 | 50.4 | 322 | 103 | 57.3 | 338 | 113 | 63.6 | 354 | 124 | 69.4 | 370 | 135 | 74.5 |
| 308 | 95 | 51.3 | 324 | 104 | 58.1 | 340 | 115 | 64.4 | 356 | 125 | 70 | 372 | 137 | 75.1 |
| 310 | 96 | 52.2 | 326 | 106 | 59 | 342 | 116 | 65.1 | 358 | 127 | 70.7 | 374 | 138 | 75.7 |
| 312 | 97 | 53.1 | 328 | 107 | 59.8 | 344 | 117 | 65.8 | 360 | 128 | 71.4 | 376 | 140 | 76.3 |
| 314 | 98 | 53.9 | 330 | 108 | 60.5 | 346 | 119 | 66.6 | 362 | 130 | 72 | 378 | 141 | 76.9 |

（续）

| HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB | HLG | HBW（$F=30D^2$） | HRB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 380 | 143 | 77.5 | 456 | 208 | 94.5 | 532 | 289 | | 608 | 391 | | 684 | 516 | |
| 382 | 144 | 78 | 458 | 209 | 94.9 | 534 | 292 | | 610 | 394 | | 686 | 519 | |
| 384 | 146 | 78.6 | 460 | 211 | 95.2 | 536 | 294 | | 612 | 397 | | 688 | 523 | |
| 386 | 147 | 79.2 | 462 | 213 | 95.6 | 538 | 297 | | 614 | 400 | | 690 | 526 | |
| 388 | 149 | 79.7 | 464 | 215 | 95.9 | 540 | 299 | | 616 | 403 | | 692 | 530 | |
| 390 | 150 | 80.2 | 466 | 217 | 96.3 | 542 | 301 | | 618 | 406 | | 694 | 534 | |
| 392 | 152 | 80.8 | 468 | 219 | 96.6 | 544 | 304 | | 620 | 409 | | 696 | 538 | |
| 394 | 153 | 81.3 | 470 | 221 | 96.9 | 546 | 306 | | 622 | 412 | | 698 | 541 | |
| 396 | 155 | 81.8 | 472 | 223 | 97.3 | 548 | 309 | | 624 | 415 | | 700 | 545 | |
| 398 | 157 | 82.3 | 474 | 225 | 97.6 | 550 | 311 | | 626 | 418 | | 702 | 549 | |
| 400 | 158 | 82.8 | 476 | 227 | 97.9 | 552 | 314 | | 628 | 421 | | 704 | 553 | |
| 402 | 160 | 83.3 | 478 | 229 | 98.3 | 554 | 317 | | 630 | 424 | | 706 | 557 | |
| 404 | 161 | 83.8 | 480 | 231 | 98.6 | 556 | 319 | | 632 | 428 | | 708 | 560 | |
| 406 | 163 | 84.3 | 482 | 233 | 98.9 | 558 | 322 | | 634 | 431 | | 710 | 564 | |
| 408 | 165 | 84.8 | 484 | 236 | 99.2 | 560 | 324 | | 636 | 434 | | 712 | 568 | |
| 410 | 166 | 85.2 | 486 | 238 | 99.6 | 562 | 327 | | 638 | 437 | | 714 | 572 | |
| 412 | 168 | 85.7 | 488 | 240 | 99.9 | 564 | 329 | | 640 | 440 | | 716 | 576 | |
| 414 | 170 | 86.2 | 490 | 242 | | 566 | 332 | | 642 | 444 | | 718 | 580 | |
| 416 | 171 | 86.6 | 492 | 244 | | 568 | 335 | | 644 | 447 | | 720 | 584 | |
| 418 | 173 | 87.1 | 494 | 246 | | 570 | 337 | | 646 | 450 | | 722 | 588 | |
| 420 | 175 | 87.5 | 496 | 248 | | 572 | 340 | | 648 | 453 | | 724 | 592 | |
| 422 | 177 | 87.9 | 498 | 250 | | 574 | 343 | | 650 | 457 | | 726 | 596 | |
| 424 | 178 | 88.3 | 500 | 253 | | 576 | 345 | | 652 | 460 | | 728 | 600 | |
| 426 | 180 | 88.8 | 502 | 255 | | 578 | 348 | | 654 | 463 | | 730 | 604 | |
| 428 | 182 | 89.2 | 504 | 257 | | 580 | 351 | | 656 | 467 | | 732 | 608 | |
| 430 | 184 | 89.6 | 506 | 259 | | 582 | 354 | | 658 | 470 | | 734 | 612 | |
| 432 | 185 | 90 | 508 | 262 | | 584 | 356 | | 660 | 473 | | 736 | 616 | |
| 434 | 187 | 90.4 | 510 | 264 | | 586 | 359 | | 662 | 477 | | 738 | 620 | |
| 436 | 189 | 90.8 | 512 | 266 | | 588 | 362 | | 664 | 480 | | 740 | 625 | |
| 438 | 191 | 91.2 | 514 | 268 | | 590 | 365 | | 666 | 484 | | 742 | 629 | |
| 440 | 193 | 91.6 | 516 | 271 | | 592 | 368 | | 668 | 487 | | 744 | 633 | |
| 442 | 194 | 92 | 518 | 273 | | 594 | 371 | | 670 | 491 | | 746 | 637 | |
| 444 | 196 | 92.3 | 520 | 275 | | 596 | 373 | | 672 | 494 | | 748 | 642 | |
| 446 | 198 | 92.7 | 522 | 278 | | 598 | 376 | | 674 | 498 | | 750 | 646 | |
| 448 | 200 | 93.1 | 524 | 280 | | 600 | 379 | | 676 | 501 | | | | |
| 450 | 202 | 93.5 | 526 | 282 | | 602 | 382 | | 678 | 505 | | | | |
| 452 | 204 | 93.8 | 528 | 285 | | 604 | 385 | | 680 | 508 | | | | |
| 454 | 206 | 94.2 | 530 | 287 | | 606 | 388 | | 682 | 512 | | | | |

**表 3-42　灰铸铁及球墨铸铁（$E \approx 170000 \sim 180000$MPa）的 G 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLG | 灰铸铁 HBW ($F=30D^2$) | 球墨铸铁 HBW ($F=30D^2$) | HLG | 灰铸铁 HBW ($F=30D^2$) | 球墨铸铁 HBW ($F=30D^2$) | HLG | 灰铸铁 HBW ($F=30D^2$) | 球墨铸铁 HBW ($F=30D^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 340 | 92 | | 416 | 141 | 160 | 492 | 205 | 226 |
| 342 | 93 | | 418 | 143 | 161 | 494 | 206 | 228 |
| 344 | 94 | | 420 | 144 | 162 | 496 | 208 | 230 |
| 346 | 96 | | 422 | 146 | 164 | 498 | 210 | 232 |
| 348 | 97 | | 424 | 147 | 165 | 500 | 212 | 234 |
| 350 | 98 | | 426 | 149 | 167 | 502 | 214 | 236 |
| 352 | 99 | | 428 | 150 | 168 | 504 | 216 | 239 |
| 354 | 100 | | 430 | 152 | 170 | 506 | 218 | 241 |
| 356 | 102 | | 432 | 153 | 171 | 508 | 220 | 243 |
| 358 | 103 | | 434 | 155 | 173 | 510 | 222 | 245 |
| 360 | 104 | | 436 | 156 | 175 | 512 | 224 | 247 |
| 362 | 105 | | 438 | 158 | 176 | 514 | 226 | 250 |
| 364 | 107 | | 440 | 160 | 178 | 516 | 228 | 252 |
| 366 | 108 | | 442 | 161 | 179 | 518 | 230 | 254 |
| 368 | 109 | | 444 | 163 | 181 | 520 | 232 | 257 |
| 370 | 110 | | 446 | 164 | 183 | 522 | 234 | 259 |
| 372 | 112 | | 448 | 166 | 184 | 524 | 236 | 261 |
| 374 | 113 | | 450 | 168 | 186 | 526 | 239 | 264 |
| 376 | 114 | | 452 | 169 | 188 | 528 | 241 | 266 |
| 378 | 115 | | 454 | 171 | 189 | 530 | 243 | 269 |
| 380 | 117 | | 456 | 173 | 191 | 532 | 245 | 271 |
| 382 | 118 | | 458 | 174 | 193 | 534 | 247 | 273 |
| 384 | 119 | | 460 | 176 | 195 | 536 | 249 | 276 |
| 386 | 121 | 140 | 462 | 178 | 197 | 538 | 251 | 278 |
| 388 | 122 | 142 | 464 | 179 | 198 | 540 | 254 | 281 |
| 390 | 123 | 143 | 466 | 181 | 200 | 542 | 256 | 283 |
| 392 | 125 | 144 | 468 | 183 | 202 | 544 | 258 | 286 |
| 394 | 126 | 145 | 470 | 185 | 204 | 546 | 260 | 289 |
| 396 | 127 | 146 | 472 | 186 | 206 | 548 | 263 | 291 |
| 398 | 129 | 148 | 474 | 188 | 208 | 550 | 265 | 294 |
| 400 | 130 | 149 | 476 | 190 | 210 | 552 | 267 | 296 |
| 402 | 132 | 150 | 478 | 192 | 212 | 554 | 269 | 299 |
| 404 | 133 | 151 | 480 | 193 | 214 | 556 | 272 | 302 |
| 406 | 134 | 153 | 482 | 195 | 216 | 558 | 274 | 304 |
| 408 | 136 | 154 | 484 | 197 | 218 | 560 | 276 | 307 |
| 410 | 137 | 155 | 486 | 199 | 220 | 562 | 279 | 310 |
| 412 | 139 | 157 | 488 | 201 | 222 | 564 | 281 | 312 |
| 414 | 140 | 158 | 490 | 203 | 224 | 566 | 284 | 315 |

（续）

| HLG | 灰铸铁 HBW （$F=30D^2$） | 球墨铸铁 HBW （$F=30D^2$） | HLG | 灰铸铁 HBW （$F=30D^2$） | 球墨铸铁 HBW （$F=30D^2$） | HLG | 灰铸铁 HBW （$F=30D^2$） | 球墨铸铁 HBW （$F=30D^2$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 568 | 286 | 318 | 580 | 301 | 335 | 592 | 316 | 352 |
| 570 | 288 | 321 | 582 | 303 | 338 | 594 | 318 | 355 |
| 572 | 291 | 323 | 584 | 306 | 340 | 596 | 321 | 358 |
| 574 | 293 | 326 | 586 | 308 | 343 | 598 | 323 | 361 |
| 576 | 296 | 329 | 588 | 311 | 346 | 600 | 326 | 364 |
| 578 | 298 | 332 | 590 | 313 | 349 | | | |

**表 3-43　低碳钢、低合金钢及铸钢（$E\approx210000$MPa）的 C 型冲击装置里氏硬度换算表**

| HLC | HV | HBW （$F=30D^2$） | HRC | HS | HLC | HV | HBW （$F=30D^2$） | HRC | HS | HLC | HV | HBW （$F=30D^2$） | HRC | HS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 350 | 80 | 80 | | | 396 | 102 | 103 | | | 442 | 131 | 131 | | |
| 352 | 80 | 81 | | | 398 | 103 | 104 | | | 444 | 133 | 132 | | |
| 354 | 81 | 81 | | | 400 | 104 | 105 | | | 446 | 134 | 133 | | |
| 356 | 82 | 82 | | | 402 | 105 | 107 | | | 448 | 135 | 135 | | |
| 358 | 83 | 83 | | | 404 | 107 | 108 | | | 450 | 137 | 136 | | |
| 360 | 84 | 84 | | | 406 | 108 | 109 | | | 452 | 138 | 137 | | |
| 362 | 85 | 85 | | | 408 | 109 | 110 | | | 454 | 140 | 139 | | |
| 364 | 86 | 86 | | | 410 | 110 | 111 | | | 456 | 141 | 140 | | |
| 366 | 86 | 87 | | | 412 | 111 | 112 | | | 458 | 143 | 141 | | |
| 368 | 87 | 88 | | | 414 | 113 | 114 | | | 460 | 144 | 143 | | |
| 370 | 88 | 89 | | | 416 | 114 | 115 | | | 462 | 146 | 144 | | |
| 372 | 89 | 90 | | | 418 | 115 | 116 | | | 464 | 147 | 145 | | |
| 374 | 90 | 91 | | | 420 | 116 | 117 | | | 466 | 149 | 147 | | |
| 376 | 91 | 92 | | | 422 | 118 | 118 | | | 468 | 150 | 148 | | |
| 378 | 92 | 94 | | | 424 | 119 | 120 | | | 470 | 152 | 150 | | |
| 380 | 93 | 95 | | | 426 | 120 | 121 | | | 472 | 153 | 151 | | |
| 382 | 94 | 96 | | | 428 | 122 | 122 | | | 474 | 155 | 152 | | |
| 384 | 95 | 97 | | | 430 | 123 | 123 | | | 476 | 156 | 151 | | |
| 386 | 96 | 98 | | | 432 | 124 | 124 | | | 478 | 158 | 155 | | |
| 388 | 97 | 99 | | | 434 | 126 | 126 | | | 480 | 160 | 157 | | |
| 390 | 99 | 100 | | | 436 | 127 | 127 | | | 482 | 161 | 158 | | |
| 392 | 100 | 101 | | | 438 | 128 | 128 | | | 484 | 163 | 160 | | |
| 394 | 101 | 102 | | | 440 | 130 | 129 | | | 486 | 164 | 161 | | |

（续）

| HLC | HV | HBW（$F=30D^2$） | HRC | HS | HLC | HV | HBW（$F=30D^2$） | HRC | HS | HLC | HV | HBW（$F=30D^2$） | HRC | HS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 488 | 166 | 163 | | | 562 | 231 | 224 | | 33.4 | 636 | 307 | 299 | 30.4 | 43.6 |
| 490 | 167 | 164 | | | 564 | 232 | 226 | | 33.7 | 638 | 309 | 301 | 30.7 | 43.9 |
| 492 | 169 | 166 | | | 566 | 234 | 227 | | 34.0 | 640 | 311 | 304 | 31.0 | 44.2 |
| 494 | 171 | 167 | | | 568 | 236 | 229 | | 34.2 | 642 | 313 | 306 | 31.3 | 44.5 |
| 496 | 172 | 169 | | | 570 | 238 | 231 | 20.0 | 34.5 | 644 | 316 | 308 | 31.6 | 44.7 |
| 498 | 174 | 170 | | | 572 | 240 | 233 | 20.4 | 34.8 | 646 | 318 | 311 | 31.9 | 45.0 |
| 500 | 176 | 172 | | | 574 | 242 | 235 | 20.7 | 35.0 | 648 | 320 | 313 | 32.1 | 45.3 |
| 502 | 177 | 173 | | | 576 | 244 | 237 | 21.1 | 35.3 | 650 | 322 | 315 | 32.4 | 45.6 |
| 504 | 179 | 175 | | | 578 | 246 | 239 | 21.4 | 35.6 | 652 | 325 | 318 | 32.7 | 45.9 |
| 506 | 181 | 176 | | | 580 | 248 | 241 | 21.7 | 35.8 | 654 | 327 | 320 | 33.0 | 46.2 |
| 508 | 182 | 178 | | | 582 | 250 | 243 | 22.1 | 36.1 | 656 | 330 | 322 | 33.3 | 46.5 |
| 510 | 184 | 179 | | | 584 | 252 | 245 | 22.4 | 36.4 | 658 | 332 | 325 | 33.5 | 46.8 |
| 512 | 186 | 181 | | | 586 | 254 | 247 | 22.7 | 36.7 | 660 | 334 | 327 | 33.8 | 47.0 |
| 514 | 187 | 183 | | | 588 | 256 | 249 | 23.1 | 36.9 | 662 | 337 | 329 | 34.1 | 47.3 |
| 516 | 189 | 184 | | | 590 | 258 | 251 | 23.4 | 37.2 | 664 | 339 | 332 | 34.4 | 47.6 |
| 518 | 191 | 186 | | | 592 | 260 | 252 | 23.7 | 37.5 | 666 | 341 | 334 | 34.6 | 47.9 |
| 520 | 193 | 187 | | | 594 | 262 | 254 | 24.0 | 37.8 | 668 | 344 | 337 | 34.9 | 48.2 |
| 522 | 194 | 189 | | | 596 | 264 | 257 | 24.4 | 38.0 | 670 | 346 | 339 | 35.2 | 48.5 |
| 524 | 196 | 191 | | | 598 | 266 | 259 | 24.7 | 38.3 | 672 | 349 | 342 | 35.4 | 48.8 |
| 526 | 198 | 192 | | | 600 | 268 | 261 | 25.0 | 38.6 | 674 | 351 | 344 | 35.7 | 49.1 |
| 528 | 200 | 194 | | | 602 | 270 | 263 | 25.3 | 38.8 | 676 | 354 | 347 | 36.0 | 49.4 |
| 530 | 201 | 196 | | | 604 | 272 | 265 | 25.6 | 39.1 | 678 | 356 | 349 | 36.3 | 49.7 |
| 532 | 203 | 197 | | | 606 | 274 | 267 | 25.9 | 39.4 | 680 | 359 | 352 | 36.5 | 49.9 |
| 534 | 205 | 199 | | | 608 | 276 | 269 | 26.2 | 39.7 | 682 | 361 | 354 | 36.8 | 50.2 |
| 536 | 207 | 201 | | | 610 | 278 | 271 | 26.5 | 40.0 | 684 | 364 | 357 | 37.1 | 50.5 |
| 538 | 208 | 202 | | | 612 | 280 | 273 | 26.9 | 40.2 | 686 | 367 | 359 | 37.3 | 50.8 |
| 540 | 210 | 204 | | | 614 | 283 | 275 | 27.2 | 40.5 | 688 | 369 | 362 | 37.6 | 51.1 |
| 542 | 212 | 206 | | | 616 | 285 | 277 | 27.5 | 40.8 | 690 | 372 | 365 | 37.9 | 51.4 |
| 544 | 214 | 208 | | | 618 | 287 | 279 | 27.8 | 41.1 | 692 | 374 | 367 | 38.1 | 51.7 |
| 546 | 216 | 209 | | | 620 | 289 | 282 | 28.1 | 41.4 | 694 | 377 | 370 | 38.4 | 52.0 |
| 548 | 218 | 211 | | | 622 | 291 | 284 | 28.4 | 41.6 | 696 | 380 | 372 | 38.6 | 52.3 |
| 550 | 219 | 213 | | 31.9 | 624 | 293 | 286 | 28.7 | 41.9 | 698 | 382 | 375 | 38.9 | 52.6 |
| 552 | 221 | 215 | | 32.1 | 626 | 295 | 288 | 29.0 | 42.2 | 700 | 385 | 378 | 39.2 | 52.9 |
| 554 | 223 | 217 | | 32.4 | 628 | 298 | 290 | 29.3 | 42.5 | 702 | 388 | 380 | 39.4 | 53.2 |
| 556 | 225 | 218 | | 32.7 | 630 | 300 | 292 | 29.5 | 42.8 | 704 | 390 | 383 | 39.7 | 53.5 |
| 558 | 227 | 220 | | 32.9 | 632 | 302 | 295 | 29.8 | 43.0 | 706 | 393 | 386 | 39.9 | 53.8 |
| 560 | 229 | 222 | | 33.2 | 634 | 304 | 297 | 30.1 | 43.3 | 708 | 396 | 389 | 40.2 | 54.1 |

（续）

| HLC | HV | HBW（$F=30D^2$） | HRC | HS | HLC | HV | HBW（$F=30D^2$） | HRC | HS | HLC | HV | HBW（$F=30D^2$） | HRC | HS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 710 | 399 | 391 | 40.5 | 54.4 | 786 | 520 | 506 | 49.9 | 66.2 | 862 | 685 | 646 | 58.9 | 79.6 |
| 712 | 401 | 394 | 40.7 | 54.7 | 788 | 524 | 510 | 50.2 | 66.6 | 864 | 690 | 650 | 59.1 | 80.0 |
| 714 | 404 | 397 | 41.0 | 55.0 | 790 | 528 | 513 | 50.4 | 66.9 | 866 | 695 | 654 | 59.4 | 80.4 |
| 716 | 407 | 400 | 41.2 | 55.3 | 792 | 531 | 517 | 50.6 | 67.2 | 868 | 700 | 658 | 59.6 | 80.8 |
| 718 | 410 | 402 | 41.5 | 55.6 | 794 | 535 | 520 | 50.9 | 67.6 | 870 | 705 | 663 | 59.8 | 81.2 |
| 720 | 413 | 405 | 41.7 | 55.9 | 796 | 539 | 523 | 51.1 | 67.9 | 872 | 711 | 667 | 60.0 | 81.6 |
| 722 | 416 | 408 | 42.0 | 56.2 | 798 | 543 | 527 | 51.4 | 68.2 | 874 | 716 | 671 | 60.3 | 82.0 |
| 724 | 419 | 411 | 42.2 | 56.5 | 800 | 547 | 530 | 51.6 | 68.5 | 876 | 721 | 675 | 60.5 | 82.4 |
| 726 | 422 | 414 | 42.5 | 56.8 | 802 | 551 | 534 | 51.8 | 68.9 | 878 | 727 | 679 | 60.7 | 82.8 |
| 728 | 424 | 417 | 42.7 | 57.1 | 804 | 555 | 537 | 52.1 | 69.2 | 880 | 732 | 683 | 61.0 | 83.2 |
| 730 | 427 | 419 | 43.0 | 57.4 | 806 | 559 | 541 | 52.3 | 69.6 | 882 | 738 |  | 61.2 | 83.6 |
| 732 | 430 | 422 | 43.3 | 57.7 | 808 | 563 | 544 | 52.6 | 69.9 | 884 | 743 |  | 61.4 | 84.0 |
| 734 | 433 | 425 | 43.5 | 58.0 | 810 | 567 | 548 | 52.8 | 70.2 | 886 | 749 |  | 61.6 | 84.4 |
| 736 | 436 | 428 | 43.8 | 58.3 | 812 | 571 | 551 | 53.0 | 70.6 | 888 | 755 |  | 61.9 | 84.9 |
| 738 | 440 | 431 | 44.0 | 58.6 | 814 | 575 | 555 | 53.3 | 70.9 | 890 | 760 |  | 62.1 | 85.3 |
| 740 | 443 | 434 | 44.3 | 58.9 | 816 | 579 | 558 | 53.5 | 71.3 | 892 | 766 |  | 62.3 | 85.7 |
| 742 | 446 | 437 | 44.5 | 59.3 | 818 | 583 | 562 | 53.7 | 71.6 | 894 | 772 |  | 62.5 | 86.1 |
| 744 | 449 | 440 | 44.8 | 59.6 | 820 | 587 | 566 | 54.0 | 72.0 | 896 | 778 |  | 62.8 | 86.6 |
| 746 | 452 | 443 | 45.0 | 59.9 | 822 | 592 | 569 | 54.2 | 72.3 | 898 | 784 |  | 63.0 | 87.0 |
| 748 | 455 | 446 | 45.3 | 60.2 | 824 | 596 | 573 | 54.5 | 72.7 | 900 | 790 |  | 63.2 | 87.4 |
| 750 | 458 | 449 | 45.5 | 60.5 | 826 | 600 | 577 | 54.7 | 73.0 | 902 | 796 |  | 63.4 | 87.9 |
| 752 | 462 | 452 | 45.7 | 60.8 | 828 | 605 | 580 | 54.9 | 73.4 | 904 | 802 |  | 63.6 | 88.3 |
| 754 | 465 | 455 | 46.0 | 61.1 | 830 | 609 | 584 | 55.2 | 73.7 | 906 | 808 |  | 63.9 | 88.8 |
| 756 | 468 | 458 | 46.2 | 61.4 | 832 | 613 | 588 | 55.4 | 74.1 | 908 | 814 |  | 64.1 | 89.2 |
| 758 | 471 | 461 | 46.5 | 61.7 | 834 | 618 | 592 | 55.6 | 74.4 | 910 | 820 |  | 64.3 | 89.7 |
| 760 | 475 | 464 | 46.7 | 62.1 | 836 | 622 | 595 | 55.9 | 74.8 | 912 | 827 |  | 64.5 | 90.1 |
| 762 | 478 | 468 | 47.0 | 62.4 | 838 | 627 | 599 | 56.1 | 75.2 | 914 | 833 |  | 64.7 | 90.6 |
| 764 | 481 | 471 | 47.2 | 62.7 | 840 | 632 | 603 | 56.3 | 75.5 | 916 | 839 |  | 64.9 | 91.0 |
| 766 | 485 | 474 | 47.5 | 63.0 | 842 | 636 | 607 | 56.6 | 75.9 | 918 | 846 |  | 65.2 | 91.5 |
| 768 | 488 | 477 | 47.7 | 63.3 | 844 | 641 | 611 | 56.8 | 76.2 | 920 | 852 |  | 65.4 | 92.0 |
| 770 | 492 | 480 | 48.0 | 63.6 | 846 | 646 | 615 | 57.0 | 76.6 | 922 | 859 |  | 65.6 | 92.4 |
| 772 | 495 | 483 | 48.2 | 64.0 | 848 | 650 | 618 | 57.3 | 77.0 | 924 | 866 |  | 65.8 | 92.9 |
| 774 | 499 | 487 | 48.5 | 64.3 | 850 | 655 | 622 | 57.5 | 77.4 | 926 | 872 |  | 66.0 | 93.4 |
| 776 | 502 | 490 | 48.7 | 64.6 | 852 | 660 | 626 | 57.7 | 77.7 | 928 | 879 |  | 66.2 | 93.9 |
| 778 | 506 | 493 | 48.9 | 64.9 | 854 | 665 | 630 | 58.0 | 78.1 | 930 | 886 |  | 66.4 | 94.4 |
| 780 | 509 | 496 | 49.2 | 65.3 | 856 | 670 | 634 | 58.2 | 78.5 | 932 | 893 |  | 66.6 | 94.9 |
| 782 | 513 | 500 | 49.4 | 65.6 | 858 | 675 | 638 | 58.4 | 78.9 | 934 | 900 |  | 66.9 | 95.4 |
| 784 | 517 | 503 | 49.7 | 65.9 | 860 | 680 | 642 | 58.7 | 79.3 | 936 | 907 |  | 67.1 | 95.9 |

（续）

| HLC | HV | HBW ($F=30D^2$) | HRC | HS | HLC | HV | HBW ($F=30D^2$) | HRC | HS | HLC | HV | HBW ($F=30D^2$) | HRC | HS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 938 | 914 | | 67.3 | 96.4 | 946 | 943 | | 68.1 | 98.5 | 954 | 973 | | 68.9 | 100.6 |
| 940 | 921 | | 67.5 | 96.9 | 948 | 950 | | 68.3 | 99.0 | 956 | 980 | | 69.1 | 101.2 |
| 942 | 928 | | 67.7 | 97.4 | 950 | 957 | | 68.5 | 99.6 | 958 | 988 | | 69.3 | 101.7 |
| 944 | 935 | | 67.9 | 98.0 | 952 | 965 | | 68.7 | 100.1 | 960 | 996 | | 69.5 | 102.3 |

## 3.8　焊接接头硬度试验

焊接接头硬度试验按照 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》进行。

### 3.8.1　试样

1）试件横截面应通过机械切割获取，通常垂直于焊接接头。

2）试样表面的制备过程应正确进行，以保证硬度测量没有受到冶金因素的影响。

3）被检测表面制备完成后最好进行适当的腐蚀，以便准确确定焊接接头不同区域的硬度测量位置。

### 3.8.2　试验设备

使用布氏硬度测试和维氏硬度测试所用的设备。

### 3.8.3　试验内容及结果表示

**1. 标线测定**（R）

1）图 3-14 ~ 图 3-20 给出了标线测定测点位置示例图，包括标线距表面的距离，通过这些测点可以对接头进行评定。必要时，可以增加标线数量和（或）在其他位置测定。测点位置应在试验报告中说明。

2）测点的数量和间距应足以确定由于焊接导致的硬化或软化区域。在热影响区相邻测点中心的距离如表 3-44 所示。

**表 3-44　在热影响区两个测点中心之间的距离**

| 硬度符号 | 两个测点中心间的推荐距离 $L$①/mm | |
|---|---|---|
| | 钢铁材料② | 铝、铜及其合金 |
| HV5 | 0.7 | 2.5 ~ 5 |
| HV10 | 1 | 3 ~ 5 |
| HBW1/2.5 | 不使用 | 2.5 ~ 5 |
| HBW2.5/15.625 | 不使用 | 3 ~ 5 |

① 任何测点中心距已检测点中心的距离 $L$ 应不小于 GB/T 4340.1 允许值。

② 奥氏体钢除外。

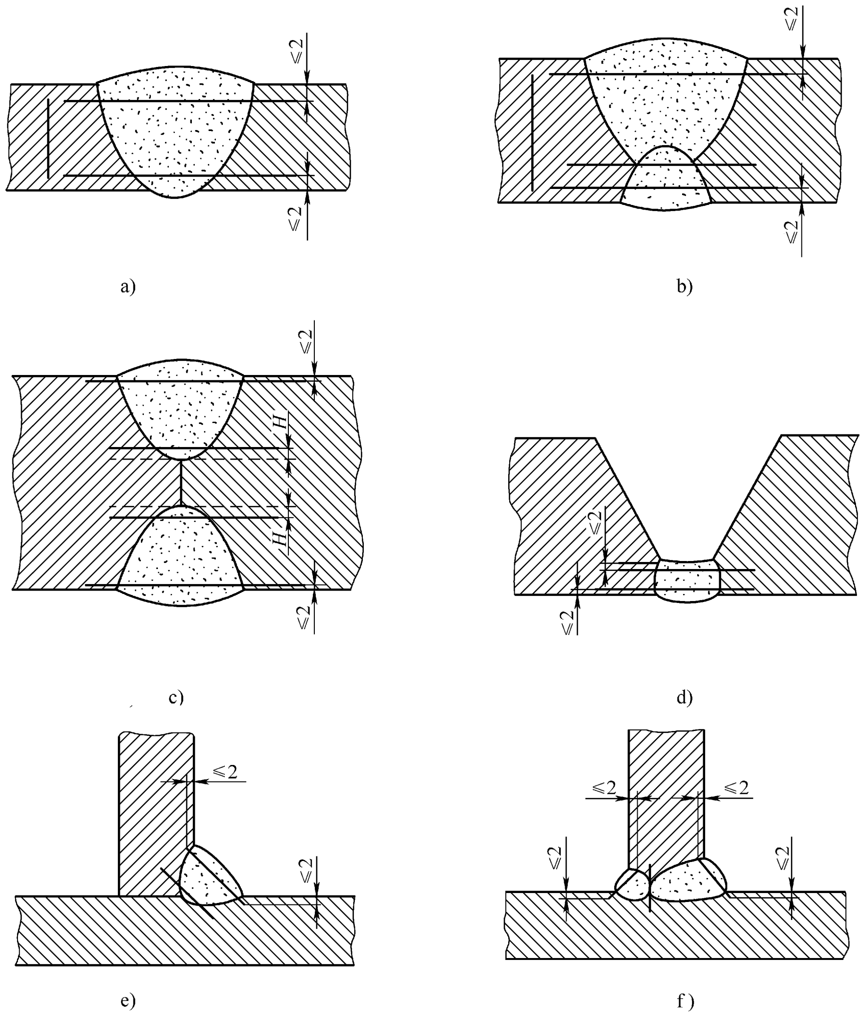



图 3-14　钢焊缝标线测定（R）示例

a）单面焊对接焊缝　b）双面焊对接焊缝　c）双面焊部分熔透对接焊缝

d）用于对单道根部焊缝硬化程度的评估　e）角焊缝　f）T 形接头

*H*—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）

3）在母材上检测时，应有足够的检测点以保证检测的准确；在焊缝金属上检测时，测点间距离的选择应确保对其作出准确评定。

4）热影响区中由于焊接引起硬化的区域应增加两个测点，测点中心与熔合线之间的距离不大于 0.5mm。

**2. 单点测定**（E）

1）图 3-21 给出了测点位置的典型区域。此外，还可根据金相检验确定测点位置。

2）为了防止由测点压痕变形产生的影响，在任何测点中心间的最小距离不得小于最近测点压痕的对角线或直径的平均值的 2.5 倍。

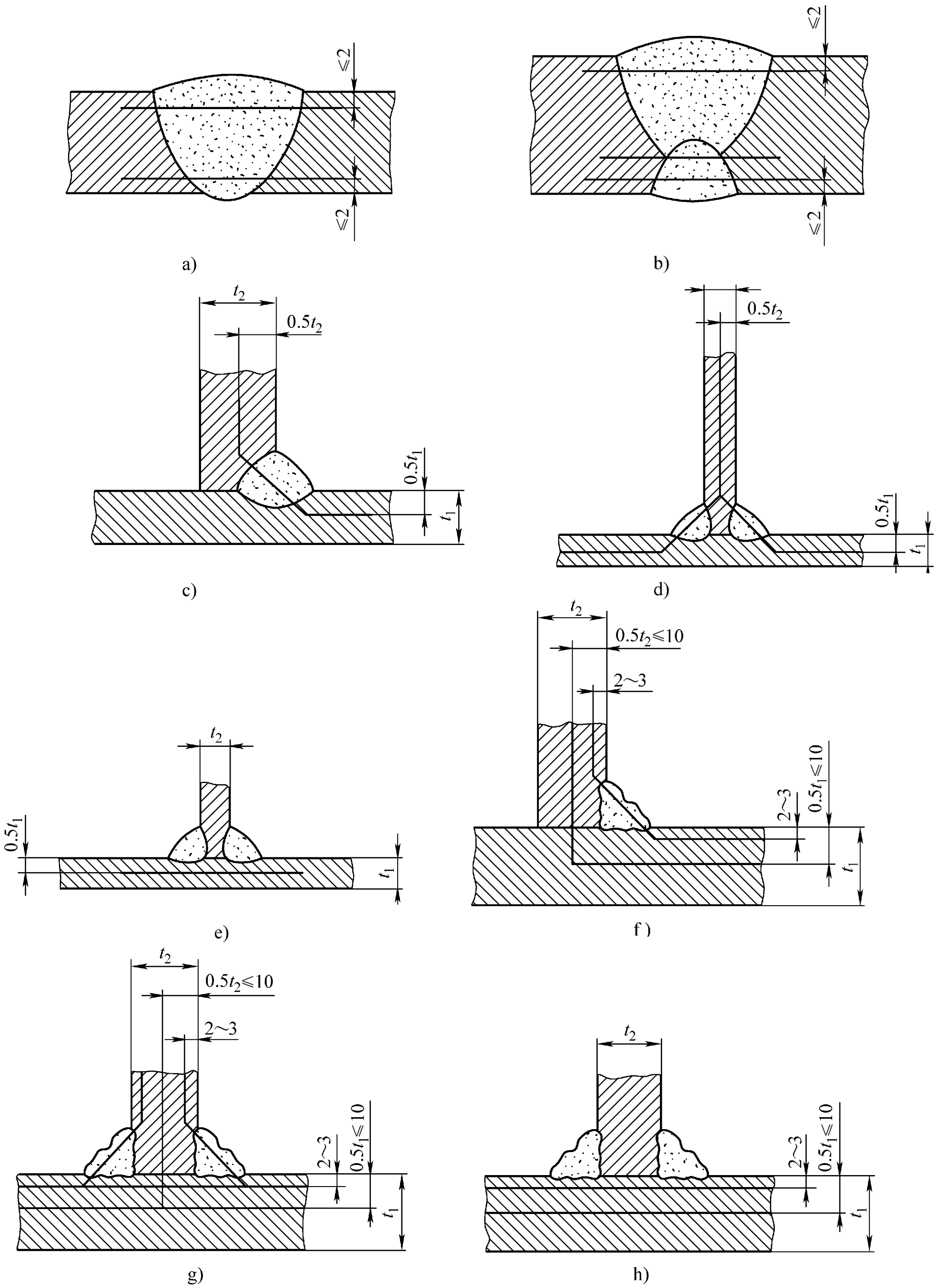



图 3-15　铝、铜及其合金焊缝标线测定（R）示例

a）单面焊对接焊缝　b）双面焊对接焊缝　c）单面角焊缝　d）双面角焊缝（单道）
e）双面角焊缝（单道，肋板不承载）　f）单面角焊缝（多道）　g）双面角焊缝（多道）
h）双面角焊缝（多道，肋板不承载）　$t_1$—横板试样的厚度（mm）　$t_2$—立板试样的厚度（mm）

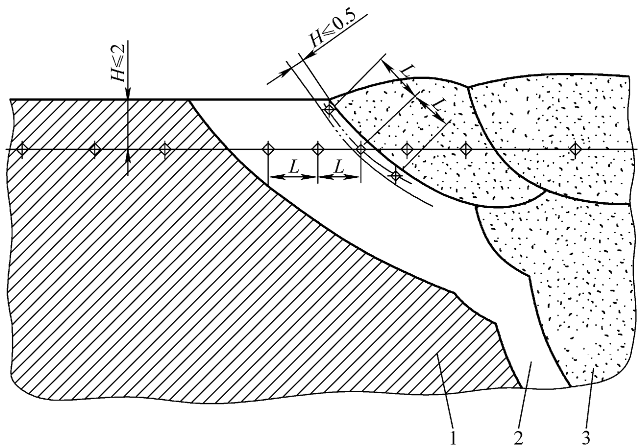



图3-16　钢（奥氏体钢除外）对接焊缝的测点位置

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

*H*—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）

*L*—在热影响区两个相邻测点中心的距离（mm）

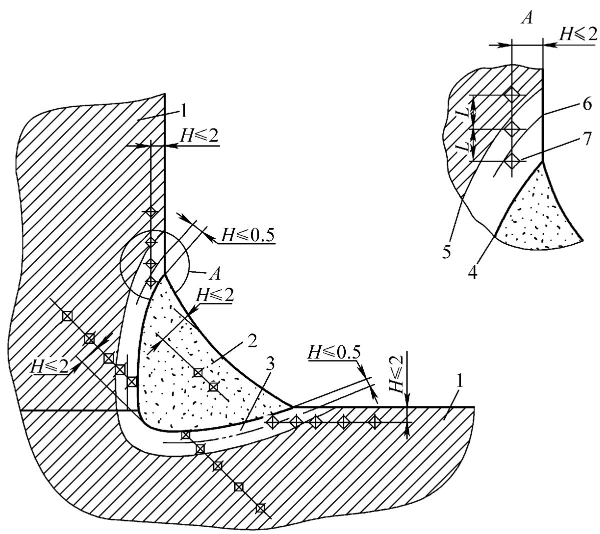



图3-17　钢（奥氏体钢除外）角焊缝的测点位置

1—母材　2—焊缝金属　3—热影响区

4—熔合线　5—热影响区靠近母材侧区域

6—热影响区靠近熔合线侧区域　7—第一个检测点位置

*H*—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）

*L*—在热影响区两个相邻测点中心的距离（mm）

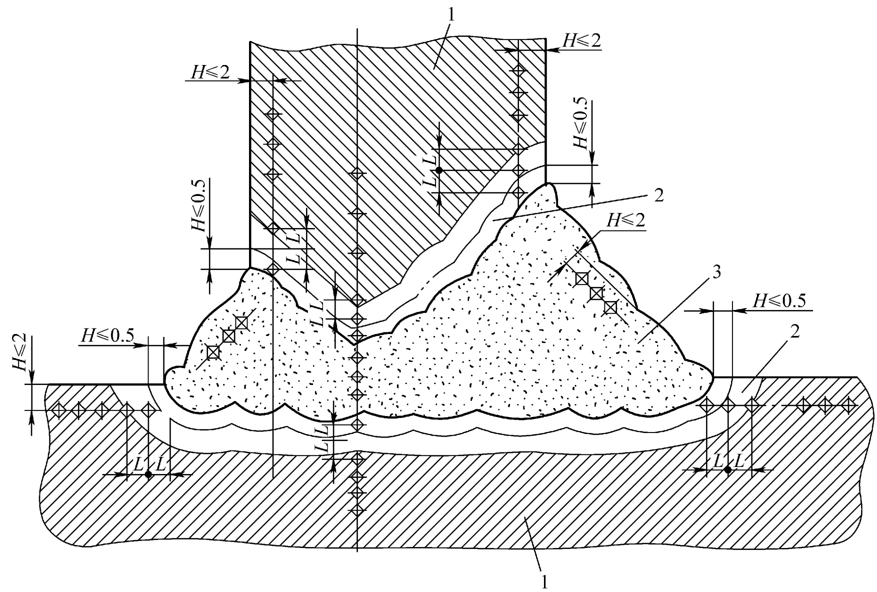



图 3-18　钢（奥氏体钢除外）T 形接头的测点位置

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

*H*—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）

*L*—在热影响区两个相邻测点中心的距离（mm）

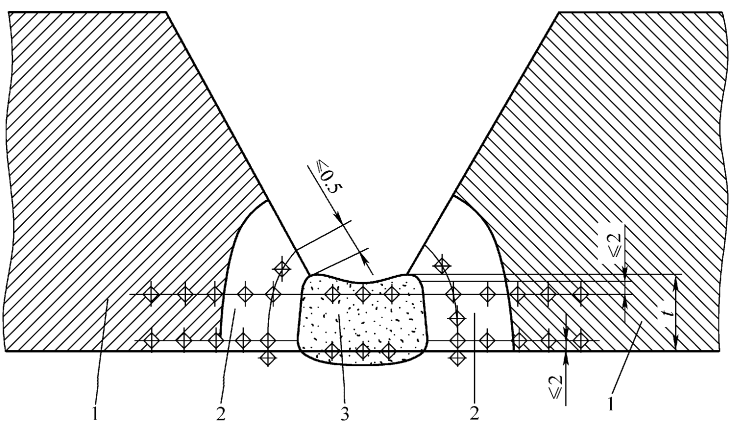



图 3-19　钢根部单道焊缝评估硬化程度的测点位置

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

*t*—试样的厚度（mm）

3）热影响区中由于焊接引起硬化的区域，至少有一个测点，测点中心与熔合线之间的距离不大于 0. 5mm。对于单点测定，测定区域应按图 3-21 所示予以编号。

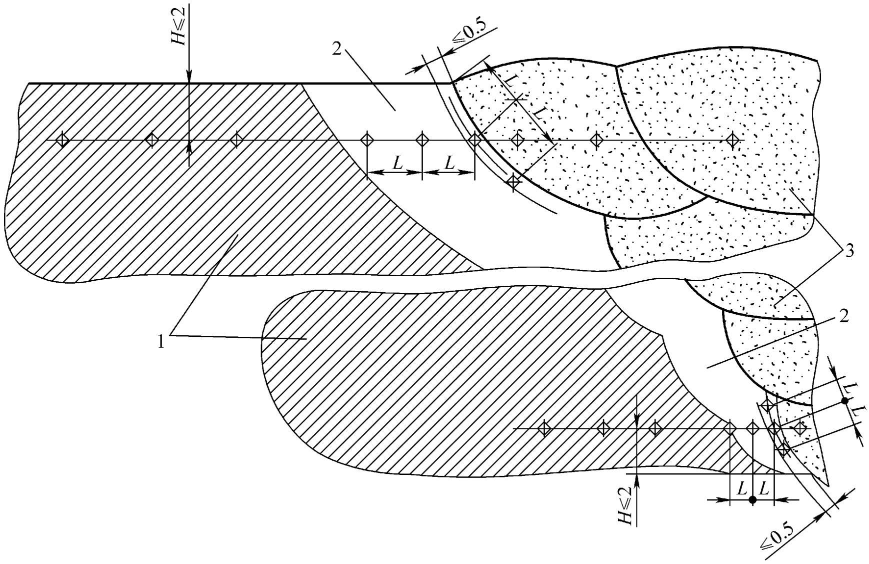



图 3-20　钢根部多道焊焊缝评估硬化程度的测点位置

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

*H*—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）

*L*—在热影响区两个相邻测点中心的距离（mm）

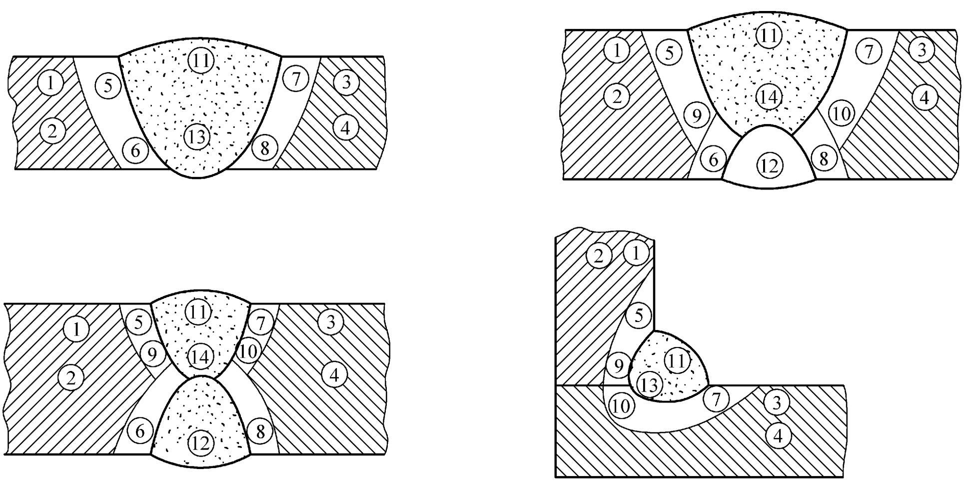


图 3-21　单点测定（E）区域示例

①～④—母材　⑤～⑩—热影响区　⑪～⑭—焊缝金属

**3. 接头硬度的测定**

按布氏硬度和维氏硬度的测试方法进行。

# 3.9　焊缝破坏性显微硬度试验

焊缝破坏性显微硬度试验按照 GB/T 27552—2011《金属材料焊缝破坏性试验　焊接接头显微硬度试验》进行。

## 3.9.1　试样

1）试件横截面应通过机械切割获取，通常垂直于焊接接头。

2）试样表面的制备过程应正确进行，以保证硬度测量没有受到冶金因素的影响。

3）被检测表面制备完成后最好进行适当的腐蚀，以便准确确定焊接接头不同区域的硬度测量位置。

## 3.9.2　试验设备

使用维氏硬度测试所用的设备。

## 3.9.3　试验内容及结果表示

**1. 标线测定**（R）

1）图3-22～图3-24 给出了标线测定检测点位置示例图，图中给出了标线测定检测点距表面的距离，通过用图中标示的检测点来评定焊接接头。如果需要，例如参照的应用标准要求，可以增加标线测定的数量和/或在其他位置检验，但检验位置应记录在试验报告中。

2）对于铝、铜及其合金，对接焊缝不一定总是需要对根部位置进行标线测定，可以省去。

3）检测点的位置和数量选择应足以确定出由于焊接引起的硬化或软化的区域。在热影响区相邻检测点的推荐距离 $L$ 按表 3-45 的要求。

4）在检测母材时，应有足够的检测点以保证检测的准确。在检测焊缝金属时，检测点间距离的选择应确保对其做出准确评定。在检测热影响区时，由于焊接引起硬化的区域应增加两个检测点，检测点中心与熔合线之间的距离不大于 0.5mm。

5）对于其他形状的接头或金属（例如奥氏体钢），其具体要求可根据相关标准或协议要求。

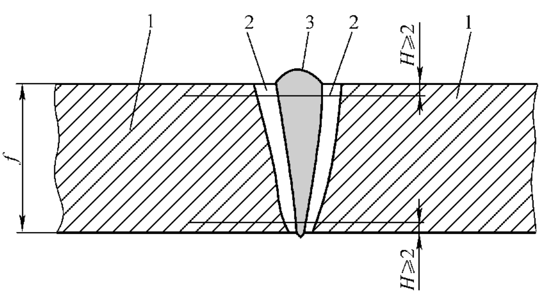



图 3-22　钢对接焊缝标线测定（R）示例

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

$H$—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）　$f$—试样厚度（mm）

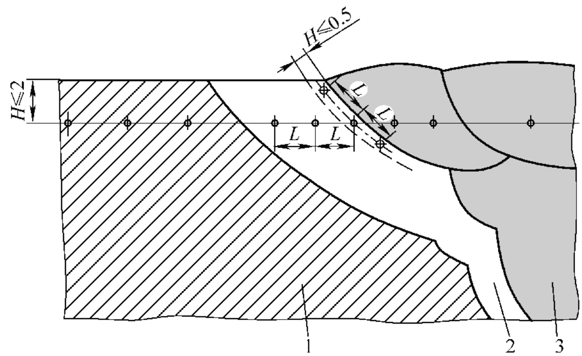



图 3-23　钢（奥氏体钢除外）对接焊缝检测点位置示例

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

*H*—标线测定时测点中心距表面或熔合线的距离（mm）

*L*—在热影响区两个相邻测点中心的距离（mm）

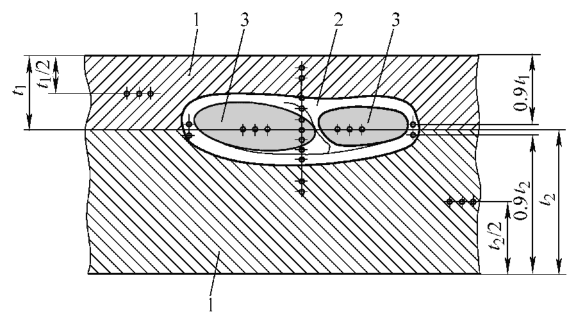



图 3-24　钢点焊和凸缝焊焊缝检测点位置示例

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

$t_1$、$t_2$—钢板厚度（mm）

**表 3-45　标线测定时热影响区两个检测点中心间的推荐距离 *L***

| 维氏硬度符号 | 两个检测点中心间的推荐距离 *L*①/mm | |
|---|---|---|
| | 钢铁材料② | 铝、铜及其合金 |
| HV0. 1 | 0. 2 | 0. 8 ~ 2 |
| HV1 | 0. 5 | 1. 5 ~ 4 |
| HV5 | 0. 7 | 2. 5 ~ 5 |

① 检测点中心间的距离 *L* 应不小于 ISO 6507-1 允许的最小值。

② 奥氏体钢除外。

**2. 单点测定**（E）

1）图 3-25 给出了测点位置的典型区域。此外，还可根据金相检验确定测点位置。

2）为了防止由测点压痕变形引起的影响，在任何测点中心间的最小距离不得小于最近测点压痕的对角线或直径的平均值的 2. 5 倍。

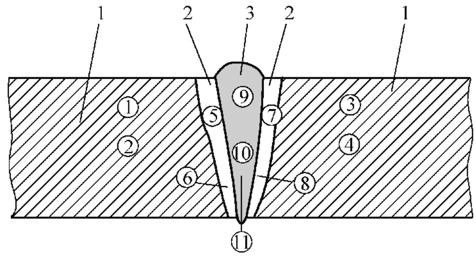



图 3-25　单点测定（E）硬度检验区域示例

1—母材　2—热影响区　3—焊缝金属

①～④—母材　⑤～⑧—热影响区　⑨～⑪—焊缝金属

3）热影响区中由于焊接引起硬化的区域，至少有一个测点，测点中心与熔合线之间的距离不大于 0.5mm。对于单点测定，测定区域应按图 3-25 所示予以编号。

**3. 接头硬度的测定**

按维氏硬度的测试方法进行。

## 3.10　钢铁热处理零件硬度检验通则

钢铁热处理零件硬度检验按照 JB/T 6050—2006《钢铁热处理零件硬度检验通则》进行。

**1. 待测试件及测试部位的选取及要求**

1）热处理后有硬度值要求的钢铁零件可全部为待测试件，也可按规定抽样选取一定数量的零件为待测试件。有时采用与零件材料和状态相同的随炉试样来代替待测试件。

2）批量零件抽样测试硬度时，抽样率与取样方式应保证被选钢铁零件具有代表性。

3）对于稳定生产的大批量钢铁零件一般可按 GB/T 2828.1—2003《计数抽样检验程序　第 1 部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划》规定进行抽样检验。

4）当随炉试样硬度的测试结果不合格时，允许对钢铁零件本体硬度进行复试，并以其结果为判定值。

5）随炉试样一般不能用于仲裁硬度测试。

6）为确保测试结果准确，待测试件外观不应存在影响测试结果的污物。

7）待测试件应有足够质量和刚度，以及选用的硬度测试方法所要求的厚度，保证测试过程中不产生振动和发生位移，以确保硬度测试结果的准确。

8）对于表面硬化层有要求的待测试件，应保证测试结果能正确表征表面硬化层的硬度。

**2. 测试面的要求**

1）制备测试面过程中，应避免过热或冷作硬化等因素对表面硬度值的影响。

2）待测试面不应有氧化、脱碳及影响测试结果的污物。

3）待测试面的表面粗糙度应符合相应硬度测试方法的规定。

4）待测试面尽可能选择平面，非平面测试面必须符合不同硬度测试方法的相关要求。

**3. 试验方法的选择**

1）应按钢铁零件技术要求的不同硬度值选用相应的金属硬度测试方法。目前通用的测试方法有 GB/T 230.1—2009《金属材料　洛氏硬度试验　第 1 部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）》、GB/T 231.1—2009《金属材料　布氏硬度试验　第1 部分：试验方法》、GB/T 4340.1—2009《金属材料　维氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》、GB/T 4341—2001《金属肖氏硬度试验方法》、GB/T 17394—1998《金属里氏硬度试验方法》、GB/T 18449.1—2009《金属材料　努氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》等。

2）冶金和其他设备用辊类件的硬度应按 GB/T 13313—2008《轧辊肖氏、里氏硬度试验方法》进行测试。

3）生产现场钢铁零件热处理后的硬度可选用里氏硬度计、超声硬度计、锤击式布氏硬度计和携带式布氏硬度计等进行测试。

4）非平面硬度测试，应根据不同情况选用不同的硬度计或测试装置。

5）经不同工艺热处理后的钢铁零件表面硬度测试方法及选用原则如表 3-46 所示，其心部或基体硬度的测试一般按 GB/T 230.1—2009《金属材料　洛氏硬度试验　第 1 部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）》、GB/T 231.1—2009《金属材料　布氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》、GB/T4340.1—2009《金属材料　维氏硬度试验　第 1 部分：试验方法》、GB/T 4341—2001《金属肖氏硬度试验方法》、GB/T 17394—1998《金属里氏硬度试验方法》进行。

**表 3-46　经不同工艺热处理后的钢铁零件表面硬度测试方法及选用原则**

| 热处理件通常类别 | 表面硬度测试方法标准 | 选 用 原 则 |
|---|---|---|
| 正火件与退火件 | GB/T 230.1、GB/T 231.1、GB/T 4340.1、GB/T 17394 | 一般按 GB/T 231.1 测试，或用 GB/T 17394 D 型装置测试 |
| 淬火件和调质件 | GB/T 230.1、GB/T 231.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 13313、GB/T 17394 | 一般按 GB/T 230.1（C 标尺）测试；辊类件按 GB/T 13313 测试；调质件按 GB/T 231.1 测试；小件、薄件按 GB/T 230.1（A 标尺或 15N 标尺）或 GB/T 4340.1 测试 |
| 表面淬火件 | GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 13313、GB/T 17394 | 一般按 GB/T 230.1（C 标尺）测试。硬化层较浅时，可选用 GB/T 4340.1 或 GB/T 230.1（15N 或 30N 标尺）测试。生产现场测试可用 GB/T 17394 中 D 型冲击装置 |
| 渗碳件与碳氮共渗件 | GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 17394 | 一般按 GB/T 230.1 测试（有效硬化层深度大于 0.6mm 时可用 A 标尺或 C 标尺）<br>硬化层深度较浅（< 0.4mm）时，可选用 GB/T 4340.1 或 GB/T 230.1（15N 或 30N 标尺） |

（续）

| 热处理件通常类别 | 表面硬度测试方法标准 | 选 用 原 则 |
|---|---|---|
| 渗氮件 | GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 4341、GB/T 18449.1、GB/T 17394 | 一般按 GB/T 4340.1 测试（试验力一般选 98.07N，如果渗氮层深度 ≤0.2mm 时，试验力一般不超过 49.03N）<br>渗氮层深度 >0.3mm 时，亦可选用 GB/T 230.1（15N 标尺）测试，化合物层硬度按 GB/T 4340.1（试验力一般 <1.961N） |
| 氮碳共渗件 | GB/T 230.1、GB/T 4340.1、GB/T 18449.1、GB/T 17394 | 一般按 GB/T 4340.1 测试（试验力一般为 0.4903N～0.9807N）；渗层深度≥0.2mm 时可选用 GB/T 17394C 型装置 |
| 其他渗非金属件<br>渗金属件 | GB/T 18449.1、GB/T 4340.1、GB/T 17394 | |

6）若确定的硬度测试方法有几种试验力可供选择时，应选用测试条件所允许的最大试验力。

**4. 测试部位**

1）测试部位应具有代表性或按照图样规定进行，钢铁零件的其他部位若能反映工作部位的硬度时也可作为测试部位。

2）测试部位应具备测试条件，能够用规定的硬度计方便、快捷、准确地进行硬度测试。

3）测试部位磨去层深度不应超过工艺要求所规定的机械加工余量。

4）选择的测试部位应保证硬度压痕不影响钢铁零件的最终质量。

5）局部淬火件的淬火区与非淬火区的交界处、局部化学热处理件的渗层与非渗层交界处、对允许存在的软点或软带的边缘处一般不应作为钢铁零件表面或基体硬度的测试部位。

**5. 测试点数**

1）对每一待测试件，应按图样要求确定测试点数，每个测试点对应一个硬度测量值。

2）每一待测试件在正式测试前，一般应先测一个点，以确认工作条件是否正常，该点不记入测试点数。

3）小尺寸批量零件的测试点数可适当减少，但应适当增加被检测零件数量。

4）可适当减少大批量同类待测试件的测试点数。

5）若发现某一测试点的测试结果异常时，允许在该测试点附近补测两次，但原异常测试结果应与补测数值同时记录。

**6. 测试结果与硬度值的表示**

1）测试结果可能是单一的硬度值，也可能是一个硬度范围，但每一个硬度值均应按不同硬度测试方法的规定来确定。如连续 5 次有效读数为一个硬度测量值，即为一个硬度值。

2）在圆柱或球面上测得的硬度值，应按 GB/T 230.1—2009《金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分：试验方法（A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺）》和 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》的规定进行修正。

3）硬度值应按 GB/T 8170—2008《数值修约规则与极限数值的表示和判定》执行修约。

4）记录硬度平均值时，一般应在硬度平均值后面加括号注明计算硬度平均值所用的各测试点硬度值，如 64.0HRC（63.7HRC、64.0HRC、64.3HRC）。

5）报出换算硬度值时，应在换算值后面加括号注明硬度实测值，如 48.5HRC（75.0HRA）。

## 3.11　金属材料各种硬度的转换

金属材料各种硬度的转换按照 MH/T 3020—2011《金属硬度标尺的转换》进行。

### 3.11.1　转换硬度值的表述

当表述转换硬度时，应将测试所得的硬度值和类型写在括号内，如 353HBW（38HRC）。

### 3.11.2　非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏 C 标尺范围）

非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏 C 标尺范围）如表 3-47 所示。表中括号内的数据表示理论值，仅供参考，不应使用。

表 3-47　非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏 C 标尺范围）

| 洛氏硬度 | 维氏硬度 | 布氏硬度 | | 努氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | | 肖氏硬度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HRC | HV | HBS① 10/3000 | HBW 10/3000 | HK ≥4.9N | HRA | HRD | HR15N | HR30N | HR45N | HS |
| 61 | 720 | — | (670) | 754 | 81.8 | 71.5 | 90.7 | 78.4 | 67.7 | 82.6 |
| 60 | 697 | — | (654) | 732 | 81.2 | 70.7 | 90.2 | 77.5 | 66.6 | 80.8 |
| 59 | 674 | — | 634 | 710 | 80.7 | 69.6 | 89.8 | 76.6 | 65.5 | 79.0 |
| 58 | 653 | — | 615 | 690 | 80.1 | 69.2 | 89.3 | 75.7 | 64.3 | 77.3 |
| 57 | 633 | — | 595 | 670 | 79.6 | 68.5 | 88.9 | 74.8 | 63.2 | 75.6 |
| 56 | 613 | — | 577 | 650 | 79.0 | 67.7 | 88.3 | 73.9 | 62.0 | 74.0 |
| 55 | 595 | — | 560 | 630 | 78.5 | 66.9 | 87.9 | 73.0 | 60.9 | 72.4 |
| 54 | 577 | — | 543 | 612 | 78.0 | 66.1 | 87.4 | 72.0 | 59.8 | 70.9 |
| 53 | 560 | — | 525 | 594 | 77.4 | 65.4 | 86.9 | 71.2 | 58.6 | 69.4 |
| 52 | 544 | (500) | 512 | 576 | 76.8 | 64.6 | 86.4 | 70.2 | 57.4 | 67.9 |
| 51 | 528 | (487) | 496 | 558 | 76.3 | 63.8 | 85.9 | 69.4 | 56.1 | 66.5 |
| 50 | 513 | (475) | 481 | 542 | 75.9 | 63.1 | 85.5 | 68.5 | 55.0 | 65.1 |
| 49 | 498 | (464) | 469 | 526 | 75.2 | 62.1 | 85.0 | 67.6 | 53.8 | 63.7 |
| 48 | 484 | 451 | 455 | 510 | 74.7 | 61.4 | 84.5 | 66.7 | 52.5 | 62.4 |
| 47 | 471 | 442 | 443 | 495 | 74.1 | 60.8 | 83.9 | 65.8 | 51.4 | 61.1 |
| 46 | 458 | 432 | 432 | 480 | 73.6 | 60.0 | 83.5 | 64.8 | 50.3 | 59.8 |
| 45 | 446 | 421 | 421 | 466 | 73.1 | 59.2 | 83.0 | 64.0 | 49.0 | 58.5 |
| 44 | 434 | 409 | 409 | 452 | 72.5 | 58.5 | 82.5 | 63.1 | 47.8 | 57.3 |
| 43 | 423 | 400 | 400 | 438 | 72.0 | 57.7 | 82.0 | 62.2 | 46.7 | 56.1 |
| 42 | 412 | 390 | 390 | 426 | 71.5 | 56.9 | 81.5 | 61.3 | 45.5 | 54.9 |
| 41 | 402 | 381 | 381 | 414 | 70.9 | 56.2 | 80.9 | 60.4 | 44.3 | 53.7 |
| 40 | 392 | 371 | 371 | 402 | 70.4 | 55.4 | 80.4 | 59.5 | 43.1 | 52.6 |

（续）

| 洛氏硬度 | 维氏硬度 | 布氏硬度 | | 努氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | | 肖氏硬度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HRC | HV | HBS[①] 10/3000 | HBW 10/3000 | HK ≥4.9N | HRA | HRD | HR15N | HR30N | HR45N | HS |
| 39 | 382 | 362 | 362 | 391 | 69.9 | 54.6 | 79.9 | 58.6 | 41.9 | 51.5 |
| 38 | 372 | 353 | 353 | 380 | 69.4 | 53.8 | 79.4 | 57.7 | 40.8 | 50.4 |
| 37 | 363 | 344 | 344 | 370 | 68.9 | 53.1 | 78.8 | 56.8 | 39.6 | 49.3 |
| 36 | 354 | 336 | 336 | 360 | 68.4 | 52.3 | 78.3 | 55.9 | 38.4 | 48.2 |
| 35 | 345 | 327 | 327 | 351 | 67.9 | 51.5 | 77.7 | 55.0 | 37.2 | 47.1 |
| 34 | 336 | 319 | 319 | 342 | 67.4 | 50.8 | 77.2 | 54.2 | 36.1 | 46.1 |
| 33 | 327 | 311 | 311 | 334 | 66.8 | 50.0 | 76.6 | 53.3 | 34.9 | 45.1 |
| 32 | 318 | 301 | 301 | 326 | 66.3 | 49.2 | 76.1 | 52.1 | 33.7 | 44.1 |
| 31 | 310 | 294 | 294 | 318 | 65.8 | 48.4 | 75.6 | 51.3 | 32.5 | 43.1 |
| 30 | 302 | 286 | 286 | 311 | 65.3 | 47.7 | 75.0 | 50.4 | 31.3 | 42.2 |
| 29 | 294 | 279 | 279 | 304 | 64.8 | 47.0 | 74.5 | 49.5 | 30.1 | 41.3 |
| 28 | 286 | 271 | 271 | 297 | 64.3 | 46.1 | 73.9 | 48.6 | 28.9 | 40.4 |
| 27 | 279 | 264 | 264 | 290 | 63.8 | 45.2 | 73.3 | 47.7 | 27.8 | 39.5 |
| 26 | 272 | 258 | 258 | 284 | 63.3 | 44.6 | 72.8 | 46.8 | 26.7 | 38.7 |
| 25 | 266 | 253 | 253 | 278 | 62.8 | 43.8 | 72.2 | 45.9 | 25.5 | 37.8 |
| 24 | 260 | 247 | 247 | 272 | 62.4 | 43.1 | 71.6 | 45.0 | 24.3 | 37.0 |
| 23 | 254 | 243 | 243 | 266 | 62.0 | 42.1 | 71.0 | 44.0 | 23.1 | 36.3 |
| 22 | 248 | 237 | 237 | 261 | 61.5 | 41.6 | 70.5 | 43.2 | 22.0 | 35.5 |
| 21 | 243 | 231 | 231 | 256 | 61.0 | 40.9 | 69.9 | 42.3 | 20.7 | 34.8 |
| 20 | 238 | 226 | 226 | 251 | 60.5 | 40.1 | 69.4 | 41.5 | 19.6 | 34.2 |

① HBS 为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在 GB/T 231.1—2009 中已取消了钢球压头。

## 3.11.3　非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏 B 标尺范围）

非奥氏体钢硬度近似转换（洛氏 B 标尺范围）如表 3-48 所示。

**表 3-48　非奥氏体钢硬度近似转换**（洛氏 B 标尺范围）

| 洛氏硬度 | 维氏硬度 | 布氏硬度 | 努氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HRB | HV | HBS[①] 10/3000 | HK ≥4.9N | HRA | HRF | HR15T | HR30T | HR45T |
| 100 | 240 | 240 | 251 | 61.5 | — | 93.1 | 83.1 | 72.9 |
| 99 | 234 | 234 | 246 | 60.9 | — | 92.8 | 82.5 | 71.9 |
| 98 | 228 | 228 | 241 | 60.2 | — | 92.5 | 81.8 | 70.9 |
| 97 | 222 | 222 | 236 | 59.5 | — | 92.1 | 81.1 | 69.9 |
| 96 | 216 | 216 | 231 | 58.9 | — | 91.8 | 80.4 | 68.9 |
| 95 | 210 | 210 | 226 | 58.3 | — | 91.5 | 79.8 | 67.9 |
| 94 | 205 | 205 | 221 | 57.6 | — | 91.2 | 79.1 | 66.9 |
| 93 | 200 | 200 | 216 | 57.0 | — | 90.8 | 78.4 | 65.9 |
| 92 | 195 | 195 | 211 | 56.4 | — | 90.5 | 77.8 | 64.8 |
| 91 | 190 | 190 | 206 | 55.8 | — | 90.2 | 77.1 | 63.8 |
| 90 | 185 | 185 | 201 | 55.2 | — | 89.9 | 76.4 | 62.8 |
| 89 | 180 | 180 | 196 | 54.6 | — | 89.5 | 75.8 | 61.8 |
| 88 | 176 | 176 | 192 | 54.0 | — | 89.2 | 75.1 | 60.8 |

（续）

| 洛氏硬度 | 维氏硬度 | 布氏硬度 | 努氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HRB | HV | HBS① 10/3000 | HK ≥4.9N | HRA | HRF | HR15T | HR30T | HR45T |
| 87 | 172 | 172 | 188 | 53.4 | — | 88.9 | 74.4 | 59.8 |
| 86 | 169 | 169 | 184 | 52.8 | — | 88.6 | 73.8 | 58.8 |
| 85 | 165 | 165 | 180 | 52.3 | — | 88.2 | 73.1 | 57.8 |
| 84 | 162 | 162 | 176 | 51.7 | — | 87.9 | 72.4 | 56.8 |
| 83 | 159 | 159 | 173 | 51.1 | — | 87.6 | 71.8 | 55.8 |
| 82 | 156 | 156 | 170 | 50.6 | — | 87.3 | 71.1 | 54.8 |
| 81 | 153 | 153 | 167 | 50.0 | — | 86.9 | 70.4 | 53.8 |
| 80 | 150 | 150 | 164 | 49.5 | — | 86.6 | 69.7 | 52.8 |
| 79 | 147 | 147 | 161 | 48.9 | — | 86.3 | 69.1 | 51.8 |
| 78 | 144 | 144 | 158 | 48.4 | — | 86.0 | 68.4 | 50.8 |
| 77 | 141 | 141 | 155 | 47.9 | — | 85.6 | 67.7 | 49.8 |
| 76 | 139 | 139 | 152 | 47.3 | — | 85.3 | 67.1 | 48.8 |
| 75 | 137 | 137 | 150 | 46.8 | 99.6 | 85.0 | 66.4 | 47.8 |
| 74 | 135 | 135 | 147 | 46.3 | 99.1 | 84.7 | 65.7 | 46.8 |
| 73 | 132 | 132 | 145 | 45.8 | 98.5 | 84.3 | 65.1 | 45.8 |
| 72 | 130 | 130 | 143 | 45.3 | 98.0 | 84.0 | 64.4 | 44.8 |
| 71 | 127 | 127 | 141 | 44.8 | 97.4 | 83.7 | 63.7 | 43.8 |
| 70 | 125 | 125 | 139 | 44.3 | 96.8 | 83.4 | 63.1 | 42.8 |
| 69 | 123 | 123 | 137 | 43.8 | 96.2 | 83.0 | 62.4 | 41.8 |
| 68 | 121 | 121 | 135 | 43.3 | 95.6 | 82.7 | 61.7 | 40.8 |
| 67 | 119 | 119 | 133 | 42.8 | 95.1 | 82.4 | 61.0 | 39.8 |
| 66 | 117 | 117 | 131 | 42.3 | 94.5 | 82.1 | 60.4 | 38.7 |
| 65 | 116 | 116 | 129 | 41.8 | 93.9 | 81.8 | 59.7 | 37.7 |
| 64 | 114 | 114 | 127 | 41.4 | 93.4 | 81.4 | 59.0 | 36.7 |
| 63 | 112 | 112 | 125 | 40.9 | 92.8 | 81.1 | 58.4 | 35.7 |
| 62 | 110 | 110 | 124 | 40.4 | 92.2 | 80.8 | 57.7 | 34.7 |
| 61 | 108 | 108 | 122 | 40.0 | 91.7 | 80.5 | 57.0 | 33.7 |
| 60 | 107 | 107 | 120 | 39.5 | 91.1 | 80.1 | 56.4 | 32.7 |
| 59 | 106 | 106 | 118 | 39.0 | 90.5 | 79.8 | 55.7 | 31.7 |
| 58 | 104 | 104 | 117 | 38.6 | 90.0 | 79.5 | 55.0 | 30.7 |
| 57 | 103 | 103 | 115 | 38.1 | 89.4 | 79.2 | 54.4 | 29.7 |
| 56 | 101 | 101 | 114 | 37.7 | 88.8 | 78.8 | 53.7 | 28.7 |
| 55 | 100 | 100 | 112 | 37.2 | 88.2 | 78.5 | 53.0 | 27.7 |
| 54 | — | — | 111 | 36.8 | 87.7 | 78.2 | 52.4 | 26.7 |
| 53 | — | — | 110 | 36.3 | 87.1 | 77.9 | 51.7 | 25.7 |
| 52 | — | — | 109 | 35.9 | 86.5 | 77.5 | 51.0 | 24.7 |
| 51 | — | — | 108 | 35.5 | 86.0 | 77.2 | 50.3 | 23.7 |
| 50 | — | — | 107 | 35.0 | 85.4 | 76.9 | 49.7 | 22.7 |
| 49 | — | — | 106 | 34.6 | 84.8 | 76.6 | 49.0 | 21.7 |
| 48 | — | — | 105 | 34.1 | 84.3 | 76.2 | 48.3 | 20.7 |
| 47 | — | — | 104 | 33.7 | 83.7 | 75.9 | 47.7 | 19.7 |
| 46 | — | — | 103 | 33.3 | 83.1 | 75.6 | 47.0 | 18.7 |
| 45 | — | — | 102 | 32.9 | 82.6 | 75.3 | 46.3 | 17.7 |

（续）

| 洛氏硬度 | 维氏硬度 | 布氏硬度 | 努氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HRB | HV | HBS①<br>10/3000 | HK<br>≥4.9N | HRA | HRF | HR15T | HR30T | HR45T |
| 44 | — | — | 101 | 32.4 | 82.0 | 74.9 | 45.7 | 16.7 |
| 43 | — | — | 100 | 32.0 | 81.4 | 74.6 | 45.0 | 15.7 |
| 42 | — | — | 99 | 31.6 | 80.8 | 74.3 | 44.3 | 14.7 |
| 41 | — | — | 98 | 31.2 | 80.3 | 74.0 | 43.7 | 13.6 |
| 40 | — | — | 97 | 30.7 | 79.7 | 73.6 | 43.0 | 12.6 |
| 39 | — | — | 96 | 30.3 | 79.1 | 73.3 | 42.3 | 11.6 |
| 38 | — | — | 95 | 29.9 | 78.6 | 73.0 | 41.6 | 10.6 |
| 37 | — | — | 94 | 29.5 | 78.0 | 72.7 | 41.0 | 9.6 |
| 36 | — | — | 93 | 29.1 | 77.4 | 72.3 | 40.3 | 8.6 |
| 35 | — | — | 92 | 28.7 | 76.9 | 72.0 | 39.6 | 7.6 |
| 34 | — | — | 91 | 28.2 | 76.3 | 71.7 | 39.0 | 6.6 |
| 33 | — | — | 90 | 27.8 | 75.7 | 71.4 | 38.3 | 5.6 |
| 32 | — | — | 89 | 27.4 | 75.2 | 71.0 | 37.6 | 4.6 |
| 31 | — | — | 88 | 27.0 | 74.6 | 70.7 | 37.0 | 3.6 |
| 30 | — | — | 87 | 26.6 | 74.0 | 70.4 | 36.3 | 2.6 |

① HBS 为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在 GB/T 231.1—2009 中已取消了钢球压头。

## 3.11.4 镍及高镍合金硬度近似转换

镍及高镍合金硬度近似转换如表 3-49 和表 3-50 所示。表中括号内的数据表示理论值，仅供参考，不应使用。

**表 3-49 镍及高镍合金硬度近似转换（Ⅰ）**

| 维氏硬度 | 布氏硬度 | 洛氏硬度 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HV | HBS①10/3000 | HRA | HRB | HRC | HRD | HRE | HRF | HRG |
| 513 | (479) | 75.5 | — | 50.0 | 63.0 | — | — | — |
| 481 | 450 | 74.5 | — | 48.0 | 61.5 | — | — | — |
| 452 | 425 | 73.5 | — | 46.0 | 60.0 | — | — | — |
| 427 | 403 | 72.5 | — | 44.0 | 58.5 | — | — | — |
| 404 | 382 | 71.5 | — | 42.0 | 57.0 | — | — | — |
| 382 | 363 | 70.5 | — | 40.0 | 55.5 | — | — | — |
| 362 | 346 | 69.5 | — | 38.0 | 54.0 | — | — | — |
| 344 | 329 | 68.5 | — | 36.0 | 52.5 | — | — | — |
| 326 | 313 | 67.5 | — | 34.0 | 50.5 | — | — | — |
| 309 | 298 | 66.5 | (106) | 32.0 | 49.5 | — | (116.5) | 94.0 |
| 285 | 275 | 64.5 | (104) | 28.5 | 46.5 | — | (115.5) | 91.0 |
| 266 | 258 | 63.0 | (102) | 25.5 | 44.5 | — | (114.5) | 87.5 |
| 248 | 241 | 61.5 | 100 | 22.5 | 42.0 | — | (113.0) | 84.5 |
| 234 | 228 | 60.5 | 98 | 20.0 | 40.0 | — | (112.0) | 81.5 |
| 220 | 215 | 59.0 | 96 | (17.0) | 38.0 | — | (111.0) | 78.5 |
| 209 | 204 | 57.5 | 94 | (14.5) | 36.0 | — | (110.0) | 75.5 |
| 198 | 194 | 56.5 | 92 | (12.0) | 34.0 | — | (108.5) | 72.0 |
| 188 | 184 | 55.0 | 90 | (9.0) | 32.0 | (108.5) | (107.5) | 69.0 |

（续）

| 维氏硬度 | 布氏硬度 | 洛 氏 硬 度 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HV | HBS[①]10/3000 | HRA | HRB | HRC | HRD | HRE | HRF | HRG |
| 179 | 176 | 53.5 | 88 | (6.5) | 30.0 | (107.0) | (106.5) | 65.5 |
| 171 | 168 | 52.5 | 86 | (4.0) | 28.0 | (106.0) | (105.0) | 62.5 |
| 164 | 161 | 51.5 | 84 | (2.0) | 26.5 | (104.5) | (104.0) | 59.5 |
| 157 | 155 | 50.0 | 82 | — | 24.5 | (103.0) | (103.0) | 56.5 |
| 151 | 149 | 49.0 | 80 | — | 22.5 | (102.0) | (101.5) | 53.0 |
| 145 | 144 | 47.5 | 78 | — | 21.0 | (100.5) | (100.5) | 50.0 |
| 140 | 139 | 46.5 | 76 | — | (19.0) | 99.5 | 99.5 | 47.0 |
| 135 | 134 | 45.5 | 74 | — | (17.5) | 98.0 | 98.5 | 43.5 |
| 130 | 129 | 44.0 | 72 | — | (16.0) | 97.0 | 97.0 | 40.0 |
| 126 | 125 | 43.0 | 70 | — | (14.5) | 95.5 | 96.0 | 37.5 |
| 122 | 121 | 42.0 | 68 | — | (13.0) | 94.5 | 95.0 | 34.5 |
| 119 | 118 | 41.0 | 66 | — | (11.5) | 93.0 | 93.5 | 31.0 |
| 115 | 114 | 40.0 | 64 | — | (10.0) | 91.5 | 92.5 | — |
| 112 | 111 | 39.0 | 62 | — | (8.0) | 90.5 | 91.5 | — |
| 108 | 108 | — | 60 | — | — | 89.0 | 90.0 | — |
| 106 | 106 | — | 58 | — | — | 88.0 | 89.0 | — |
| 103 | 103 | — | 56 | — | — | 86.5 | 88.0 | — |
| 100 | 100 | — | 54 | — | — | 85.5 | 87.0 | — |
| 98 | 98 | — | 52 | — | — | 84.0 | 85.5 | — |
| 95 | 95 | — | 50 | — | — | 83.0 | 84.5 | — |
| 93 | 93 | — | 48 | — | — | 81.5 | 83.5 | — |
| 91 | 91 | — | 46 | — | — | 80.5 | 82.0 | — |
| 89 | 89 | — | 44 | — | — | 79.0 | 81.0 | — |
| 87 | 87 | — | 42 | — | — | 78.0 | 80.0 | — |
| 85 | 85 | — | 40 | — | — | 76.5 | 79.0 | — |
| 83 | 83 | — | 38 | — | — | 75.0 | 77.5 | — |
| 81 | 81 | — | 36 | — | — | 74.0 | 76.5 | — |
| 79 | 79 | — | 34 | — | — | 72.5 | 75.5 | — |
| 78 | 78 | — | 32 | — | — | 71.5 | 74.0 | — |
| 77 | 77 | — | 30 | — | — | 70.0 | 73.0 | — |

① HBS 为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在 GB/T 231.1—2009 中已取消了钢球压头。

**表 3-50　镍及高镍合金硬度近似转换（Ⅱ）**

| 维氏硬度 | 洛氏硬度 | 表 面 硬 度 | | | | | | 努氏硬度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HV | HRK | HR15N | HR30N | HR45N | HR15T | HR30T | HR45T | HK 4.9N 9.807N |
| 513 | — | 85.5 | 68.0 | 54.5 | — | — | — | — |
| 481 | — | 84.5 | 66.5 | 52.5 | — | — | — | — |
| 452 | — | 83.5 | 64.5 | 50.0 | — | — | — | — |
| 427 | — | 82.5 | 63.0 | 47.5 | — | — | — | — |
| 404 | — | 81.5 | 61.0 | 45.5 | — | — | — | — |
| 382 | — | 80.5 | 59.5 | 43.0 | — | — | — | 436 |
| 362 | — | 79.5 | 58.0 | 41.0 | — | — | — | 413 |

（续）

| 维氏硬度 | 洛氏硬度 | 表 面 硬 度 | | | | | | 努氏硬度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HV | HRK | HR15N | HR30N | HR45N | HR15T | HR30T | HR45T | HK<br>4.9N<br>9.807N |
| 344 | — | 78.5 | 56.0 | 38.5 | — | — | — | 392 |
| 326 | — | 77.5 | 54.5 | 36.0 | — | — | — | 372 |
| 309 | — | 76.5 | 52.5 | 34.0 | 94.5 | 85.5 | 77.0 | 352 |
| 285 | — | 75.0 | 49.5 | 30.0 | 94.0 | 84.5 | 75.0 | 325 |
| 266 | — | 73.5 | 47.0 | 26.5 | 93.0 | 83.0 | 73.0 | 304 |
| 248 | — | 72.0 | 44.5 | 23.0 | 92.5 | 81.5 | 71.0 | 283 |
| 234 | — | 70.5 | 42.0 | 20.0 | 92.0 | 80.5 | 69.0 | 267 |
| 220 | 100 | 69.0 | 39.5 | 17.0 | 91.0 | 79.0 | 67.0 | 251 |
| 209 | 98.0 | 68.0 | 37.5 | 14.0 | 90.5 | 77.5 | 65.0 | 239 |
| 198 | 96.5 | 66.5 | 35.5 | 11.0 | 89.5 | 76.0 | 63.0 | 226 |
| 188 | 94.5 | 65.0 | 32.5 | 7.5 | 89.0 | 75.0 | 61.0 | 215 |
| 179 | 93.0 | 64.0 | 30.5 | 5.0 | 88.0 | 73.5 | 59.5 | 204 |
| 171 | 91.0 | 62.5 | 28.5 | 2.0 | 87.5 | 72.0 | 57.5 | 195 |
| 164 | 89.0 | 61.5 | 26.5 | — | 87.0 | 70.5 | 55.5 | 187 |
| 157 | 87.5 | — | — | — | 86.0 | 69.5 | 53.5 | 179 |
| 151 | 85.5 | — | — | — | 85.5 | 68.0 | 51.5 | 173 |
| 145 | 83.5 | — | — | — | 84.5 | 66.5 | 49.5 | 166 |
| 140 | 82.0 | — | — | — | 84.0 | 65.5 | 47.5 | 160 |
| 135 | 80.0 | — | — | — | 83.0 | 64.0 | 45.5 | 154 |
| 130 | 78.0 | — | — | — | 82.5 | 62.5 | 43.5 | 149 |
| 126 | 76.5 | — | — | — | 82.0 | 61.0 | 41.5 | 144 |
| 122 | 74.5 | — | — | — | 81.0 | 60.0 | 39.5 | 140 |
| 119 | 72.5 | — | — | — | 80.5 | 58.5 | 37.5 | 136 |
| 115 | 71.0 | — | — | — | 79.5 | 57.0 | 35.5 | — |
| 112 | 69.0 | — | — | — | 79.0 | 56.0 | 33.5 | — |
| 108 | 67.5 | — | — | — | 78.5 | 54.5 | 31.5 | — |
| 106 | 65.5 | — | — | — | 77.5 | 53.0 | 29.5 | — |
| 103 | 63.5 | — | — | — | 77.0 | 51.5 | 27.5 | — |
| 100 | 62.0 | — | — | — | 76.0 | 50.5 | 25.5 | — |
| 98 | 60.0 | — | — | — | 75.5 | 49.0 | 23.5 | — |
| 95 | 58.0 | — | — | — | 74.5 | 47.5 | 21.5 | — |
| 93 | 56.5 | — | — | — | 74.0 | 46.5 | 19.5 | — |
| 91 | 54.5 | — | — | — | 73.5 | 45.0 | 17.0 | — |
| 89 | 52.5 | — | — | — | 72.5 | 43.5 | 14.5 | — |
| 87 | 51.0 | — | — | — | 72.0 | 42.0 | 12.5 | — |
| 85 | 49.0 | — | — | — | 71.0 | 41.0 | 10.0 | — |
| 83 | 47.0 | — | — | — | 70.5 | 39.5 | 7.5 | — |
| 81 | 45.5 | — | — | — | 70.0 | 38.0 | 5.5 | — |
| 79 | 43.5 | — | — | — | 69.0 | 36.5 | 3.0 | — |
| 78 | 42.0 | — | — | — | 68.5 | 35.5 | 1.0 | — |
| 77 | 40.0 | — | — | — | 67.5 | 34.0 | (−1.5) | — |

## 3.11.5　弹壳黄铜硬度近似转换

弹壳黄铜（H70）硬度近似转换如表 3-51 所示。

表 3-51　弹壳黄铜（H70）硬度近似转换

| 维氏硬度 | 布氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| HV | HBS①10/500 | HRB | HRF | HR15T | HR30T | HR45T |
| 196 | 169 | 93.5 | 110.0 | 90.0 | 77.5 | 66.0 |
| 194 | 167 | — | 109.5 | — | — | 65.5 |
| 192 | 166 | 93.0 | — | — | 77.0 | 65.0 |
| 190 | 164 | 92.5 | 109.0 | — | 76.5 | 64.5 |
| 188 | 162 | 92.0 | — | 89.5 | — | 64.0 |
| 186 | 161 | 91.5 | 108.5 | — | 76.0 | 63.5 |
| 184 | 159 | 91.0 | — | — | 75.5 | 63.0 |
| 182 | 157 | 90.5 | 108.0 | 89.0 | — | 62.5 |
| 180 | 156 | 90.0 | 107.5 | — | 75.0 | 62.0 |
| 178 | 154 | 89.0 | — | — | 74.5 | 61.5 |
| 176 | 152 | 88.5 | 107.0 | — | — | 61.0 |
| 174 | 150 | 88.0 | — | 88.5 | 74.0 | 60.5 |
| 172 | 149 | 87.5 | 106.5 | — | 73.5 | 60.0 |
| 170 | 147 | 87.0 | — | — | — | 59.5 |
| 168 | 146 | 86.0 | 106.0 | 88.0 | 73.0 | 59.0 |
| 166 | 144 | 85.5 | — | — | 72.5 | 58.5 |
| 164 | 142 | 85.0 | 105.5 | — | 72.0 | 58.0 |
| 162 | 141 | 84.0 | 105.0 | 87.5 | — | 57.5 |
| 160 | 139 | 83.5 | — | — | 71.5 | 56.5 |
| 158 | 138 | 83.0 | 104.5 | — | 71.0 | 56.0 |
| 156 | 136 | 82.0 | 104.0 | 87.0 | 70.5 | 55.5 |
| 154 | 135 | 81.5 | 103.5 | — | 70.0 | 54.5 |
| 152 | 133 | 80.5 | 103.0 | — | — | 54.0 |
| 150 | 131 | 80.0 | — | 86.5 | 69.5 | 53.5 |
| 148 | 129 | 79.0 | 102.5 | — | 69.0 | 53.0 |
| 146 | 128 | 78.0 | 102.0 | — | 68.5 | 52.5 |
| 144 | 126 | 77.5 | 101.5 | 86.0 | 68 | 51.5 |
| 142 | 124 | 77.0 | 101.0 | — | 67.5 | 51.0 |
| 140 | 122 | 76.0 | 100.5 | 85.5 | 67.0 | 50.0 |
| 138 | 121 | 75.0 | 100.0 | — | 66.5 | 49.0 |
| 136 | 120 | 74.5 | 99.5 | 85.0 | 66.0 | 48.0 |
| 134 | 118 | 73.5 | 99.0 | — | 65.5 | 47.5 |
| 132 | 116 | 73.0 | 98.5 | 84.5 | 65.0 | 46.5 |
| 130 | 114 | 72.0 | 98.0 | 84.0 | 64.5 | 45.5 |
| 128 | 113 | 71.0 | 97.5 | — | 63.5 | 45.0 |
| 126 | 112 | 70.0 | 97.0 | 83.5 | 63.0 | 44.0 |
| 124 | 110 | 69.0 | 96.5 | — | 62.5 | 43.0 |
| 122 | 108 | 68.0 | 96.0 | 83.0 | 62.0 | 42.0 |
| 120 | 106 | 67.0 | 95.5 | — | 61.0 | 41.0 |
| 118 | 105 | 66.0 | 95.0 | 82.5 | 60.5 | 40.0 |

（续）

| 维氏硬度 | 布氏硬度 | 洛氏硬度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| HV | HBS①10/500 | HRB | HRF | HR15T | HR30T | HR45T |
| 116 | 103 | 65.0 | 94.5 | 82.0 | 60.0 | 39.0 |
| 114 | 101 | 64.0 | 94.0 | 81.5 | 59.5 | 38.0 |
| 112 | 99 | 63.0 | 93.0 | 81.0 | 58.5 | 37.0 |
| 110 | 97 | 62.0 | 92.6 | 80.5 | 58.0 | 35.5 |
| 108 | 95 | 61.0 | 92.0 | — | 57.0 | 34.5 |
| 106 | 94 | 59.5 | 91.2 | 80.0 | 56.0 | 33.0 |
| 104 | 92 | 58.0 | 90.5 | 79.5 | 55.0 | 32.0 |
| 102 | 90 | 57.0 | 89.8 | 79.0 | 54.5 | 30.5 |
| 100 | 88 | 56.0 | 89.0 | 78.5 | 53.5 | 29.5 |
| 98 | 86 | 54.0 | 88.0 | 78.0 | 52.5 | 28.0 |
| 96 | 85 | 53.0 | 87.2 | 77.5 | 51.5 | 26.5 |
| 94 | 83 | 51.0 | 86.3 | 77.0 | 50.5 | 24.5 |
| 92 | 82 | 49.5 | 85.4 | 76.5 | 49.0 | 23.0 |
| 90 | 80 | 47.5 | 84.4 | 75.5 | 48.0 | 21.0 |
| 88 | 79 | 46.0 | 83.5 | 75.0 | 47.0 | 19.0 |
| 86 | 77 | 44.0 | 82.3 | 74.5 | 45.5 | 17.0 |
| 84 | 76 | 42.0 | 81.2 | 73.5 | 44.0 | 14.5 |
| 82 | 74 | 40.0 | 80.0 | 73.0 | 43.0 | 12.5 |
| 80 | 72 | 37.5 | 78.6 | 72.0 | 41.0 | 10.0 |
| 78 | 70 | 35.0 | 77.4 | 71.5 | 39.5 | 7.5 |
| 76 | 68 | 32.5 | 76.0 | 70.5 | 38.0 | 4.5 |
| 74 | 66 | 30.0 | 74.8 | 70.0 | 36.0 | 1.0 |
| 72 | 64 | 27.5 | 73.2 | 69.0 | 34.0 | — |
| 70 | 63 | 24.5 | 71.8 | 68.0 | 32.0 | — |
| 64 | 59 | 15.5 | 66.8 | 65.0 | 25.5 | — |
| 62 | 57 | 12.5 | 65.0 | 63.5 | 23.0 | — |
| 60 | 55 | 10.0 | 62.5 | 62.5 | — | — |
| 58 | 53 | — | 61.0 | 61.0 | 18.0 | — |
| 56 | 52 | — | 58.8 | 60.0 | 15.0 | — |
| 54 | 50 | — | 56.5 | 58.5 | 12.0 | — |
| 52 | 48 | — | 53.5 | 57.0 | — | — |
| 50 | 47 | — | 50.5 | 55.5 | — | — |
| 49 | 46 | — | 49.0 | 54.5 | — | — |
| 48 | 45 | — | 47.0 | 53.5 | — | — |
| 47 | 44 | — | 45.0 | — | — | — |
| 46 | 43 | — | 43.0 | — | — | — |
| 45 | 42 | — | 40.0 | — | — | — |

① HBS 为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在 GB/T 231.1—2009 中已取消了钢球压头。

## 3.11.6 奥氏体不锈钢板退火后布氏-洛氏 B 标尺硬度近似转换

奥氏体不锈钢板退火后布氏-洛氏 B 标尺硬度近似转换如表 3-52 所示。

表3-52　奥氏体不锈钢板退火后布氏-洛氏B标尺硬度近似转换表

| 洛氏硬度 | 布氏硬度 | 洛氏硬度 | 布氏硬度 |
|---|---|---|---|
| HRB | HBS①10/3000 | HRB | HBS①10/3000 |
| 100 | 256 | 79 | 150 |
| 99 | 248 | 78 | 147 |
| 98 | 240 | 77 | 144 |
| 97 | 233 | 76 | 142 |
| 96 | 226 | 75 | 139 |
| 95 | 219 | 74 | 137 |
| 94 | 213 | 73 | 135 |
| 93 | 207 | 72 | 132 |
| 92 | 202 | 71 | 130 |
| 91 | 197 | 70 | 128 |
| 90 | 192 | 69 | 126 |
| 89 | 187 | 68 | 124 |
| 88 | 183 | 67 | 122 |
| 87 | 178 | 66 | 120 |
| 86 | 174 | 65 | 118 |
| 85 | 170 | 64 | 116 |
| 84 | 167 | 63 | 114 |
| 83 | 163 | 62 | 113 |
| 82 | 160 | 61 | 111 |
| 81 | 156 | 60 | 110 |
| 80 | 153 | — | — |

① HBS为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在GB/T 231.1—2009中已取消了钢球压头。

## 3.11.7　奥氏体不锈钢薄板洛氏硬度近似转换

奥氏体不锈钢薄板洛氏硬度近似转换如表3-53和表3-54所示。表3-54中括号内的数据表示理论值，仅供参考，不应使用。

表3-53　奥氏体不锈钢薄板洛氏硬度近似转换（Ⅰ）

| 洛 氏 硬 度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|
| HRC | HRA | HR15N | HR30N | HR45N |
| 48 | 74.4 | 84.1 | 66.2 | 52.1 |
| 47 | 73.9 | 83.6 | 65.3 | 50.9 |
| 46 | 73.4 | 83.1 | 64.5 | 49.8 |
| 45 | 72.9 | 82.6 | 63.6 | 48.7 |
| 44 | 72.4 | 82.1 | 62.7 | 47.5 |
| 43 | 71.9 | 81.6 | 61.8 | 46.4 |
| 42 | 71.4 | 81.0 | 61.0 | 45.2 |
| 41 | 70.9 | 80.5 | 60.1 | 44.1 |
| 40 | 70.4 | 80.0 | 59.2 | 43.0 |
| 39 | 69.9 | 79.5 | 58.4 | 41.8 |
| 38 | 69.3 | 79.0 | 57.5 | 40.7 |
| 37 | 68.8 | 78.5 | 56.6 | 39.6 |
| 36 | 68.3 | 78.0 | 55.7 | 38.4 |

（续）

| 洛 氏 硬 度 | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|
| HRC | HRA | HR15N | HR30N | HR45N |
| 35 | 67.8 | 77.5 | 54.9 | 37.3 |
| 34 | 67.3 | 77.0 | 54.0 | 36.1 |
| 33 | 66.8 | 76.5 | 53.1 | 35.0 |
| 32 | 66.3 | 75.9 | 52.3 | 33.9 |
| 31 | 65.8 | 75.4 | 51.4 | 32.7 |
| 30 | 65.3 | 74.9 | 50.5 | 31.6 |
| 29 | 64.8 | 74.4 | 49.6 | 30.4 |
| 28 | 64.3 | 73.9 | 48.8 | 29.3 |
| 27 | 63.8 | 73.4 | 47.9 | 28.2 |
| 26 | 63.3 | 72.9 | 47.0 | 27.0 |
| 25 | 62.8 | 72.4 | 46.2 | 25.9 |
| 24 | 62.3 | 71.9 | 45.3 | 24.8 |
| 23 | 61.8 | 71.3 | 44.4 | 23.6 |
| 22 | 61.3 | 70.8 | 43.5 | 22.5 |
| 21 | 60.8 | 70.3 | 42.7 | 21.3 |
| 20 | 60.3 | 69.8 | 41.8 | 20.2 |

**表 3-54　奥氏体不锈钢薄板洛氏硬度近似转换（Ⅱ）**

| HRBS | HRA | HRFS | HR15TS | HR30TS | HR45TS |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 61.5 | (113.9) | 91.5 | 80.4 | 70.2 |
| 99 | 60.9 | (113.2) | 91.2 | 79.7 | 69.2 |
| 98 | 60.3 | (112.5) | 90.8 | 79.0 | 68.2 |
| 97 | 59.7 | (111.8) | 90.4 | 78.3 | 67.2 |
| 96 | 59.1 | (111.1) | 90.1 | 77.7 | 66.1 |
| 95 | 58.5 | (110.5) | 89.7 | 77.0 | 65.1 |
| 94 | 58.0 | (109.8) | 89.3 | 76.3 | 64.1 |
| 93 | 57.4 | (109.1) | 88.9 | 75.6 | 63.1 |
| 92 | 56.8 | (108.4) | 88.6 | 74.9 | 62.1 |
| 91 | 56.2 | (107.8) | 88.2 | 74.2 | 61.1 |
| 90 | 55.6 | (107.1) | 87.8 | 73.5 | 60.1 |
| 89 | 55.0 | (106.4) | 87.5 | 72.8 | 59.0 |
| 88 | 54.5 | (105.7) | 87.1 | 72.1 | 58.0 |
| 87 | 53.9 | (105.0) | 86.7 | 71.4 | 57.0 |
| 86 | 53.3 | (104.4) | 86.4 | 70.7 | 56.0 |
| 85 | 52.7 | (103.7) | 86.0 | 70.0 | 55.0 |
| 84 | 52.1 | (103.0) | 85.6 | 69.3 | 54.0 |
| 83 | 51.5 | (102.3) | 85.2 | 68.6 | 52.9 |
| 82 | 50.9 | (101.7) | 84.9 | 67.9 | 51.9 |
| 81 | 50.4 | (101.0) | 84.5 | 67.2 | 50.9 |
| 80 | 49.8 | (100.3) | 84.1 | 66.5 | 49.9 |
| 79 | 49.2 | 99.6 | 83.8 | 65.8 | 48.9 |
| 78 | 48.6 | 99.0 | 83.4 | 65.1 | 47.9 |
| 77 | 48.0 | 98.3 | 83.0 | 64.4 | 46.8 |
| 76 | 47.4 | 97.6 | 82.6 | 63.7 | 45.8 |

（续）

| HRBS | HRA | HRFS | HR15TS | HR30TS | HR45TS |
|---|---|---|---|---|---|
| 75 | 46.9 | 96.9 | 82.3 | 63.0 | 44.8 |
| 74 | 46.3 | 96.2 | 81.9 | 62.4 | 43.8 |
| 73 | 45.7 | 95.6 | 81.5 | 61.7 | 42.8 |
| 72 | 45.1 | 94.9 | 81.2 | 61.0 | 41.8 |
| 71 | 44.5 | 94.2 | 80.8 | 60.3 | 40.7 |
| 70 | 43.9 | 93.5 | 80.4 | 59.6 | 39.7 |
| 69 | 43.3 | 92.8 | 80.1 | 58.9 | 38.7 |
| 68 | 42.8 | 92.2 | 79.7 | 58.2 | 37.7 |
| 67 | 42.2 | 91.5 | 79.3 | 57.5 | 36.7 |
| 66 | 41.6 | 90.8 | 78.9 | 56.8 | 35.7 |
| 65 | 41.0 | 90.1 | 78.6 | 56.1 | 34.7 |
| 64 | 40.4 | 89.5 | 78.2 | 55.4 | 33.6 |
| 63 | 39.8 | 88.8 | 77.8 | 54.7 | 32.6 |
| 62 | 39.3 | 88.1 | 77.5 | 54.0 | 31.6 |
| 61 | 38.7 | 87.4 | 77.1 | 53.3 | 30.6 |
| 60 | 38.1 | 86.8 | 76.7 | 52.6 | 29.6 |

## 3.11.8　变形铝合金硬度近似转换

变形铝合金硬度近似转换如表 3-55 所示。

**表 3-55　变形铝合金硬度近似转换**

| 布氏硬度 | 维氏硬度 | 洛氏硬度 | | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HBS[①]10/500 | HV15 | HRB | HRE | HRH | HR15T | HR30T | HR15W |
| 160 | 189 | 91 | — | — | 89 | 77 | 95 |
| 155 | 183 | 90 | — | — | 89 | 76 | 95 |
| 150 | 177 | 89 | — | — | 89 | 75 | 94 |
| 145 | 171 | 87 | — | — | 88 | 74 | 94 |
| 140 | 165 | 86 | — | — | 88 | 73 | 94 |
| 135 | 159 | 84 | — | — | 87 | 71 | 93 |
| 130 | 153 | 81 | — | — | 87 | 70 | 93 |
| 125 | 147 | 79 | — | — | 86 | 68 | 92 |
| 120 | 141 | 76 | — | — | 86 | 67 | 92 |
| 115 | 135 | 72 | 101 | — | 86 | 65 | 91 |
| 110 | 129 | 69 | 100 | — | 85 | 63 | 91 |
| 105 | 123 | 65 | 99 | — | 84 | 61 | 91 |
| 100 | 117 | 60 | 98 | — | 83 | 59 | 90 |
| 95 | 111 | 56 | 96 | — | 82 | 57 | 90 |
| 90 | 105 | 51 | 94 | 108 | 81 | 54 | 89 |
| 85 | 98 | 46 | 91 | 107 | 80 | 52 | 89 |
| 80 | 92 | 40 | 88 | 106 | 78 | 50 | 88 |
| 75 | 86 | 34 | 84 | 104 | 76 | 47 | 87 |
| 70 | 80 | 28 | 80 | 102 | 74 | 44 | 86 |
| 65 | 74 | — | 75 | 100 | 72 | — | 85 |
| 60 | 68 | — | 70 | 97 | 70 | — | 83 |

（续）

| 布氏硬度 | 维氏硬度 | 洛氏硬度 | | | 表面洛氏硬度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HBS①10/500 | HV15 | HRB | HRE | HRH | HR15T | HR30T | HR15W |
| 55 | 62 | — | 65 | 94 | 67 | — | 82 |
| 50 | 56 | — | 59 | 91 | 64 | — | 80 |
| 45 | 50 | — | 53 | 87 | 62 | — | 79 |
| 40 | 44 | — | 46 | 83 | 59 | — | 77 |

① HBS 为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在 GB/T 231. 1—2009 中已取消了钢球压头。

### 3. 11. 9　各种硬度间的换算关系

各种硬度间的换算关系如表 3-56 所示。

**表 3-56　各种硬度间的换算关系**

| 洛氏硬度 HRC | 肖氏硬度 HS | 维氏硬度 HV | 布氏硬度 HBW | 洛氏硬度 HRC | 肖氏硬度 HS | 维氏硬度 HV | 布氏硬度 HBW | 洛氏硬度 HRC | 肖氏硬度 HS | 维氏硬度 HV | 布氏硬度 HBW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 70 | — | 1037 | — | 52 | 69. 1 | 543 | — | 34 | 46. 6 | 320 | 314 |
| 69 | — | 997 | — | 51 | 67. 7 | 525 | 501 | 33 | 45. 6 | 312 | 306 |
| 68 | 96. 6 | 959 | — | 50 | 66. 3 | 509 | 488 | 32 | 44. 5 | 304 | 298 |
| 67 | 94. 6 | 923 | — | 49 | 65 | 493 | 474 | 31 | 43. 5 | 296 | 291 |
| 66 | 92. 6 | 889 | — | 48 | 63. 7 | 478 | 461 | 30 | 42. 5 | 289 | 283 |
| 65 | 90. 5 | 856 | — | 47 | 62. 3 | 463 | 449 | 29 | 41. 6 | 281 | 276 |
| 64 | 88. 4 | 825 | — | 46 | 61 | 449 | 436 | 28 | 40. 6 | 274 | 269 |
| 63 | 86. 5 | 795 | — | 45 | 59. 7 | 436 | 424 | 27 | 39. 7 | 268 | 263 |
| 62 | 84. 8 | 766 | — | 44 | 58. 4 | 423 | 413 | 26 | 38. 8 | 261 | 257 |
| 61 | 83. 1 | 739 | — | 43 | 57. 1 | 411 | 401 | 25 | 37. 9 | 255 | 251 |
| 60 | 81. 4 | 713 | — | 42 | 55. 9 | 399 | 391 | 24 | 37 | 249 | 245 |
| 59 | 79. 7 | 688 | — | 41 | 54. 7 | 388 | 380 | 23 | 36. 3 | 243 | 240 |
| 58 | 78. 1 | 664 | — | 40 | 53. 5 | 377 | 370 | 22 | 35. 5 | 237 | 234 |
| 57 | 76. 5 | 642 | — | 39 | 52. 3 | 367 | 360 | 21 | 34. 7 | 231 | 229 |
| 56 | 74. 9 | 620 | — | 38 | 51. 1 | 357 | 350 | 20 | 34 | 226 | 225 |
| 55 | 73. 5 | 599 | — | 37 | 50 | 347 | 341 | 19 | 33. 2 | 221 | 220 |
| 54 | 71. 9 | 579 | — | 36 | 48. 8 | 338 | 332 | 18 | 32. 6 | 216 | 216 |
| 53 | 70. 5 | 561 | — | 35 | 47. 8 | 329 | 323 | 17 | 31. 9 | 211 | 211 |

## 3. 12　金属材料各种硬度与强度的转换

### 3. 12. 1　钢铁材料硬度与强度的换算关系

钢铁材料硬度与强度的换算关系如表 3-57 所示。

**表 3-57　钢铁材料硬度与强度的换算关系（GB/T 1172—1999）**

| 硬度 | | | | | | | | 抗拉强度 $R_m$/MPa | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 洛氏 | | 表面洛氏 | | | 维氏 | 布氏（0.012$F$/$D^2$=30） | | 碳钢 | 铬钢 | 铬钒钢 | 铬镍钢 | 铬钼钢 | 铬镍钼钢 | 铬锰硅钢 | 超高强度钢 | 不锈钢 |
| HRC | HRA | HR15N | HR30N | HR45N | HV | HBS① | HBW | | | | | | | | | |
| 20.0 | 60.2 | 68.8 | 40.7 | 19.2 | 226 | 225 | — | 774 | 742 | 736 | 782 | 747 | — | 781 | — | 740 |
| 20.5 | 60.4 | 69.0 | 41.2 | 19.8 | 228 | 227 | — | 784 | 751 | 744 | 787 | 753 | — | 788 | — | 749 |
| 21.0 | 60.7 | 69.3 | 41.7 | 20.4 | 230 | 229 | — | 793 | 760 | 753 | 792 | 760 | — | 794 | — | 758 |
| 21.5 | 61.0 | 69.5 | 42.2 | 21.0 | 233 | 232 | — | 803 | 769 | 761 | 797 | 767 | — | 801 | — | 767 |
| 22.0 | 61.2 | 69.8 | 42.6 | 21.5 | 235 | 234 | — | 813 | 779 | 770 | 803 | 774 | — | 809 | — | 777 |
| 22.5 | 61.5 | 70.0 | 43.1 | 22.1 | 238 | 237 | — | 823 | 788 | 779 | 809 | 781 | — | 816 | — | 786 |
| 23.0 | 61.7 | 70.3 | 43.6 | 22.7 | 241 | 240 | — | 833 | 798 | 788 | 815 | 789 | — | 824 | — | 796 |
| 23.5 | 62.0 | 70.6 | 44.0 | 23.3 | 244 | 242 | — | 843 | 808 | 797 | 822 | 797 | — | 832 | — | 806 |
| 24.0 | 62.2 | 70.8 | 44.5 | 23.9 | 247 | 245 | — | 854 | 818 | 807 | 829 | 805 | — | 840 | — | 816 |
| 24.5 | 62.5 | 71.1 | 45.0 | 24.5 | 250 | 248 | — | 864 | 828 | 816 | 836 | 813 | — | 848 | — | 826 |
| 25.0 | 62.8 | 71.4 | 45.5 | 25.1 | 253 | 251 | — | 875 | 838 | 826 | 843 | 822 | — | 856 | — | 837 |
| 25.5 | 63.0 | 71.6 | 45.9 | 25.7 | 256 | 254 | — | 886 | 848 | 837 | 851 | 831 | 850 | 865 | — | 847 |
| 26.0 | 63.3 | 71.9 | 46.4 | 26.3 | 259 | 257 | — | 897 | 859 | 847 | 859 | 840 | 859 | 874 | — | 858 |
| 26.5 | 63.5 | 72.2 | 46.9 | 26.9 | 262 | 260 | — | 908 | 870 | 858 | 867 | 850 | 869 | 883 | — | 868 |
| 27.0 | 63.8 | 72.4 | 47.3 | 27.5 | 266 | 263 | — | 919 | 880 | 869 | 876 | 860 | 879 | 893 | — | 879 |
| 27.5 | 64.0 | 72.7 | 47.8 | 28.1 | 269 | 266 | — | 930 | 891 | 880 | 885 | 870 | 890 | 902 | — | 890 |
| 28.0 | 64.3 | 73.0 | 48.3 | 28.7 | 273 | 269 | — | 942 | 902 | 892 | 894 | 880 | 901 | 912 | — | 901 |
| 28.5 | 64.6 | 73.3 | 48.7 | 29.3 | 276 | 273 | — | 954 | 914 | 903 | 904 | 891 | 912 | 922 | — | 913 |
| 29.0 | 64.8 | 73.5 | 49.2 | 29.9 | 280 | 276 | — | 965 | 925 | 915 | 914 | 902 | 923 | 933 | — | 924 |
| 29.5 | 65.1 | 73.8 | 49.7 | 30.5 | 284 | 280 | — | 977 | 937 | 928 | 924 | 913 | 935 | 943 | — | 936 |
| 30.0 | 65.3 | 74.1 | 50.2 | 31.1 | 288 | 283 | — | 989 | 948 | 940 | 935 | 924 | 947 | 954 | — | 947 |
| 30.5 | 65.6 | 74.4 | 50.6 | 31.7 | 292 | 287 | — | 1002 | 960 | 953 | 946 | 936 | 959 | 965 | — | 959 |
| 31.0 | 65.8 | 74.7 | 51.1 | 32.3 | 296 | 291 | — | 1014 | 972 | 966 | 957 | 948 | 972 | 977 | — | 971 |
| 31.5 | 66.1 | 74.9 | 51.6 | 32.9 | 300 | 294 | — | 1027 | 984 | 980 | 969 | 961 | 985 | 989 | — | 983 |
| 32.0 | 66.4 | 75.2 | 52.0 | 33.5 | 304 | 298 | — | 1039 | 996 | 993 | 981 | 974 | 999 | 1001 | — | 996 |
| 32.5 | 66.6 | 75.5 | 52.5 | 34.1 | 308 | 302 | — | 1052 | 1009 | 1007 | 994 | 987 | 1012 | 1013 | — | 1008 |
| 33.0 | 66.9 | 75.8 | 53.0 | 34.7 | 313 | 306 | — | 1065 | 1022 | 1022 | 1007 | 1001 | 1027 | 1026 | — | 1021 |
| 33.5 | 67.1 | 76.1 | 53.4 | 35.3 | 317 | 310 | — | 1078 | 1034 | 1036 | 1020 | 1015 | 1041 | 1039 | — | 1034 |
| 34.0 | 67.4 | 76.4 | 53.9 | 35.9 | 321 | 314 | — | 1092 | 1048 | 1051 | 1034 | 1029 | 1056 | 1052 | — | 1047 |
| 34.5 | 67.7 | 76.7 | 54.4 | 36.5 | 326 | 318 | — | 1105 | 1061 | 1067 | 1048 | 1043 | 1071 | 1066 | — | 1060 |
| 35.0 | 67.9 | 77.0 | 54.8 | 37.0 | 331 | 323 | — | 1119 | 1074 | 1082 | 1063 | 1058 | 1087 | 1079 | — | 1074 |
| 35.5 | 68.2 | 77.2 | 55.3 | 37.6 | 335 | 327 | — | 1133 | 1088 | 1098 | 1078 | 1074 | 1103 | 1094 | — | 1087 |
| 36.0 | 68.4 | 77.5 | 55.8 | 38.2 | 340 | 332 | — | 1147 | 1102 | 1114 | 1093 | 1090 | 1119 | 1108 | — | 1101 |
| 36.5 | 68.7 | 77.8 | 56.2 | 38.8 | 345 | 336 | — | 1162 | 1116 | 1131 | 1109 | 1106 | 1136 | 1123 | — | 1116 |
| 37.0 | 69.0 | 78.1 | 56.7 | 39.4 | 350 | 341 | — | 1177 | 1131 | 1148 | 1125 | 1122 | 1153 | 1139 | — | 1130 |
| 37.5 | 69.2 | 78.4 | 57.2 | 40.0 | 355 | 345 | — | 1192 | 1146 | 1165 | 1142 | 1139 | 1171 | 1155 | — | 1145 |
| 38.0 | 69.5 | 78.7 | 57.6 | 40.6 | 360 | 350 | — | 1207 | 1161 | 1183 | 1159 | 1157 | 1189 | 1171 | — | 1161 |
| 38.5 | 69.7 | 79.0 | 58.1 | 41.2 | 365 | 355 | — | 1222 | 1176 | 1201 | 1177 | 1174 | 1207 | 1187 | 1170 | 1176 |
| 39.0 | 70.0 | 79.3 | 58.6 | 41.8 | 371 | 360 | — | 1238 | 1192 | 1219 | 1195 | 1192 | 1226 | 1204 | 1195 | 1193 |

（续）

| 硬　　度 | | | | | | | | 抗拉强度 $R_m$/MPa | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 洛氏 | | 表面洛氏 | | | 维氏 | 布氏（$0.012F/D^2=30$） | | 碳钢 | 铬钢 | 铬钒钢 | 铬镍钢 | 铬钼钢 | 铬镍钼钢 | 铬锰硅钢 | 超高强度钢 | 不锈钢 |
| HRC | HRA | HR15N | HR30N | HR45N | HV | HBS① | HBW | | | | | | | | | |
| 39.5 | 70.3 | 79.6 | 59.0 | 42.4 | 376 | 365 | — | 1254 | 1208 | 1238 | 1214 | 1211 | 1245 | 1222 | 1219 | 1209 |
| 40.0 | 70.5 | 79.9 | 59.5 | 43.0 | 381 | 370 | 370 | 1271 | 1225 | 1257 | 1233 | 1230 | 1265 | 1240 | 1243 | 1226 |
| 40.5 | 70.8 | 80.2 | 60.0 | 43.6 | 387 | 375 | 375 | 1288 | 1242 | 1276 | 1252 | 1249 | 1285 | 1258 | 1267 | 1244 |
| 41.0 | 71.1 | 80.5 | 60.4 | 44.2 | 393 | 380 | 381 | 1305 | 1260 | 1296 | 1273 | 1269 | 1306 | 1277 | 1290 | 1262 |
| 41.5 | 71.3 | 80.8 | 60.9 | 44.8 | 398 | 385 | 386 | 1322 | 1278 | 1317 | 1293 | 1289 | 1327 | 1296 | 1313 | 1280 |
| 42.0 | 71.6 | 81.1 | 61.3 | 45.4 | 404 | 391 | 392 | 1340 | 1296 | 1337 | 1314 | 1310 | 1348 | 1316 | 1336 | 1299 |
| 42.5 | 71.8 | 81.4 | 61.8 | 45.9 | 410 | 396 | 397 | 1359 | 1315 | 1358 | 1336 | 1331 | 1370 | 1336 | 1359 | 1319 |
| 43.0 | 72.1 | 81.7 | 62.3 | 46.5 | 416 | 401 | 403 | 1378 | 1335 | 1380 | 1358 | 1353 | 1392 | 1357 | 1381 | 1339 |
| 43.5 | 72.4 | 82.0 | 62.7 | 47.1 | 422 | 407 | 409 | 1397 | 1355 | 1401 | 1380 | 1375 | 1415 | 1378 | 1404 | 1361 |
| 44.0 | 72.6 | 82.3 | 63.2 | 47.7 | 428 | 413 | 415 | 1417 | 1376 | 1424 | 1404 | 1397 | 1439 | 1400 | 1427 | 1383 |
| 44.5 | 72.9 | 82.6 | 63.6 | 48.3 | 435 | 418 | 422 | 1438 | 1398 | 1446 | 1427 | 1420 | 1462 | 1422 | 1450 | 1405 |
| 45.0 | 73.2 | 82.9 | 64.1 | 48.9 | 441 | 424 | 428 | 1459 | 1420 | 1469 | 1451 | 1444 | 1487 | 1445 | 1473 | 1429 |
| 45.5 | 73.4 | 83.2 | 64.6 | 49.5 | 448 | 430 | 435 | 1481 | 1444 | 1493 | 1476 | 1468 | 1512 | 1469 | 1496 | 1453 |
| 46.0 | 73.7 | 83.5 | 65.0 | 50.1 | 454 | 436 | 441 | 1503 | 1468 | 1517 | 1502 | 1492 | 1537 | 1493 | 1520 | 1479 |
| 46.5 | 73.9 | 83.7 | 65.5 | 50.7 | 461 | 442 | 448 | 1526 | 1493 | 1541 | 1527 | 1517 | 1563 | 1517 | 1544 | 1505 |
| 47.0 | 74.2 | 84.0 | 65.9 | 51.2 | 468 | 449 | 455 | 1550 | 1519 | 1566 | 1554 | 1542 | 1589 | 1543 | 1569 | 1533 |
| 47.5 | 74.5 | 84.3 | 66.4 | 51.8 | 475 | — | 463 | 1575 | 1546 | 1591 | 1581 | 1568 | 1616 | 1569 | 1594 | 1562 |
| 48.0 | 74.7 | 84.6 | 66.8 | 52.4 | 482 | — | 470 | 1600 | 1574 | 1617 | 1608 | 1595 | 1643 | 1595 | 1620 | 1592 |
| 48.5 | 75.0 | 84.9 | 67.3 | 53.0 | 489 | — | 478 | 1626 | 1603 | 1643 | 1636 | 1622 | 1671 | 1623 | 1646 | 1623 |
| 49.0 | 75.3 | 85.2 | 67.7 | 53.6 | 497 | — | 486 | 1653 | 1633 | 1670 | 1665 | 1649 | 1699 | 1651 | 1674 | 1655 |
| 49.5 | 75.5 | 85.5 | 68.2 | 54.2 | 504 | — | 494 | 1681 | 1665 | 1697 | 1695 | 1677 | 1728 | 1679 | 1702 | 1689 |
| 50.0 | 75.8 | 85.7 | 68.6 | 54.7 | 512 | — | 502 | 1710 | 1698 | 1724 | 1724 | 1706 | 1758 | 1709 | 1731 | 1725 |
| 50.5 | 76.1 | 86.0 | 69.1 | 55.3 | 520 | — | 510 | — | 1732 | 1752 | 1755 | 1735 | 1788 | 1739 | 1761 | — |
| 51.0 | 76.3 | 86.3 | 69.5 | 55.9 | 527 | — | 518 | — | 1768 | 1780 | 1786 | 1764 | 1819 | 1770 | 1792 | — |
| 51.5 | 76.6 | 86.6 | 70.0 | 56.5 | 535 | — | 527 | — | 1806 | 1809 | 1818 | 1794 | 1850 | 1801 | 1824 | — |
| 52.0 | 76.9 | 86.8 | 70.4 | 57.1 | 544 | — | 535 | — | 1845 | 1839 | 1850 | 1825 | 1881 | 1834 | 1857 | — |
| 52.5 | 77.1 | 87.1 | 70.9 | 57.6 | 552 | — | 544 | — | — | 1869 | 1883 | 1856 | 1914 | 1867 | 1892 | — |
| 53.0 | 77.4 | 87.4 | 71.3 | 58.2 | 561 | — | 552 | — | — | 1899 | 1917 | 1888 | 1947 | 1901 | 1929 | — |
| 53.5 | 77.7 | 87.6 | 71.8 | 58.8 | 569 | — | 561 | — | — | 1930 | 1951 | — | — | 1936 | 1966 | — |
| 54.0 | 77.9 | 87.9 | 72.2 | 59.4 | 578 | — | 569 | — | — | 1961 | 1986 | — | — | 1971 | 2006 | — |
| 54.5 | 78.2 | 88.1 | 72.6 | 59.9 | 587 | — | 577 | — | — | 1993 | 2022 | — | — | 2008 | 2047 | — |
| 55.0 | 78.5 | 88.4 | 73.1 | 60.5 | 596 | — | 585 | — | — | 2026 | 2058 | — | — | 2045 | 2090 | — |
| 55.5 | 78.7 | 88.6 | 73.5 | 61.1 | 606 | — | 593 | — | — | — | — | — | — | — | 2135 | — |
| 56.0 | 79.0 | 88.9 | 73.9 | 61.7 | 615 | — | 601 | — | — | — | — | — | — | — | 2181 | — |
| 56.5 | 79.3 | 89.1 | 74.4 | 62.2 | 625 | — | 608 | — | — | — | — | — | — | — | 2230 | — |
| 57.0 | 79.5 | 89.4 | 74.8 | 62.8 | 635 | — | 616 | — | — | — | — | — | — | — | 2281 | — |
| 57.5 | 79.8 | 89.6 | 75.2 | 63.4 | 645 | — | 622 | — | — | — | — | — | — | — | 2334 | — |
| 58.0 | 80.1 | 89.8 | 75.6 | 63.9 | 655 | — | 628 | — | — | — | — | — | — | — | 2390 | — |
| 58.5 | 80.3 | 90.0 | 76.1 | 64.5 | 666 | — | 634 | — | — | — | — | — | — | — | 2448 | — |
| 59.0 | 80.6 | 90.2 | 76.5 | 65.1 | 676 | — | 639 | — | — | — | — | — | — | — | 2509 | — |

（续）

| 硬度 | | | | | | | | 抗拉强度 $R_m$/MPa | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 洛氏 | | 表面洛氏 | | | 维氏 | 布氏（0.012$F/D^2$ = 30） | | 碳钢 | 铬钢 | 铬钒钢 | 铬镍钢 | 铬钼钢 | 铬镍钼钢 | 铬锰硅钢 | 超高强度钢 | 不锈钢 |
| HRC | HRA | HR15N | HR30N | HR45N | HV | HBS① | HBW | | | | | | | | | |
| 59.5 | 80.9 | 90.4 | 76.9 | 65.6 | 687 | — | 643 | — | — | — | — | — | — | — | 2572 | — |
| 60.0 | 81.2 | 90.6 | 77.3 | 66.2 | 698 | — | 647 | — | — | — | — | — | — | — | 2639 | — |
| 60.5 | 81.4 | 90.8 | 77.7 | 66.8 | 710 | — | 650 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 61.0 | 81.7 | 91.0 | 78.1 | 67.3 | 721 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 61.5 | 82.0 | 91.2 | 78.6 | 67.9 | 733 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 62.0 | 82.2 | 91.4 | 79.0 | 68.4 | 745 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 62.5 | 82.5 | 91.5 | 79.4 | 69.0 | 757 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 63.0 | 82.8 | 91.7 | 79.8 | 69.5 | 770 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 63.5 | 83.1 | 91.8 | 80.2 | 70.1 | 782 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 64.0 | 83.3 | 91.9 | 80.6 | 70.6 | 795 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 64.5 | 83.6 | 92.1 | 81.0 | 71.2 | 809 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 65.0 | 83.9 | 92.2 | 81.3 | 71.7 | 822 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 65.5 | 84.1 | — | — | — | 836 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 66.0 | 84.4 | — | — | — | 850 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 66.5 | 84.7 | — | — | — | 865 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 67.0 | 85.0 | — | — | — | 879 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 67.5 | 85.2 | — | — | — | 894 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 68.0 | 85.5 | — | — | — | 909 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

① HBS 为采用钢球压头所测试的布氏硬度值，在 GB/T 231.1—2009 中已取消了钢球压头。

### 3.12.2　非铁金属材料硬度与强度的换算关系

非铁金属材料硬度（HBW）与抗拉强度 $R_m$（MPa）的关系可按关系式 $R_m = K\mathrm{HBW}$ 计算，其中强度-硬度系数 $K$ 值按表 3-58 取值。

**表 3-58　非铁金属材料强度-硬度系数 $K$ 值**

| 材　料 | $K$ 值 | 材　料 | $K$ 值 |
|---|---|---|---|
| 铝 | 2.7 | 铝黄铜 | 4.8 |
| 铅 | 2.9 | 铸铝 ZL103 | 2.12 |
| 锡 | 2.9 | 铸铝 ZL101 | 2.66 |
| 铜 | 5.5 | 硬铝 | 3.6 |
| 单相黄铜 | 3.5 | 锌合金铸件 | 0.9 |
| H62 | 4.3 ~ 4.6 | | |

## 3.13　塑料球压痕法硬度测试

塑料球压痕法硬度测试按照 GB/T 3398.1—2008《塑料　硬度测定　第 1 部分：球

压痕法》进行。

### 3.13.1 试样

每个试样应为一个光滑的平板或有足够尺寸的样块，以减小边缘对试验结果的影响，例如 20mm×20mm，试样的两表面间应平行，推荐的厚度为 4mm。

试样的支撑面在试验后不应显示任何形变。

若试样厚度小于 4mm，可以放几个试样。不过，叠加的试样上得到的硬度值和同样厚度单片试样所得到的值会有差异。

在某些情况下，特别是半结晶热塑性塑料的注塑试样，要获得精准的平板状试样是困难的。若所用的试样稍有翘曲，所测得压入深度包括把试样压向支撑板所移动的距离。为消除这一影响，可使用一直径为 10mm±1mm 的圆形支撑板，这一直径对于平板试样也足够大了，还推荐将试样较平的一侧朝向支撑板放置。

### 3.13.2 试验设备

（1）硬度试验机　主要是由装有一个试样支撑板的可调整台架、带有连接部件的压痕器以及无冲击的施加负荷的装置构成。硬度试验机还应配备测量压痕器压入深度在 0.4mm 范围内的设备，其测量精密度为 ±0.005mm。在最大负荷下，沿若加力主轴进行变形测量时，框架变形不大于 0.05mm。压痕器是一个经过硬化并抛光的钢球，试验后该钢球不能显出任何变形或损伤。钢球的直径应为 5.0mm±0.05mm。

（2）计时器　准确至 ±0.1s。

### 3.13.3 试验内容及结果表示

**1. 状态调节**

试验前，试样的状态调节应按 GB/T 2918 规定的标准环境进行。

**2. 试验步骤**

1）除非另有规定，试验应在与状态调节同样的环境中进行。

2）把试样放在支撑板上，充分地支撑试样并使试样表面垂直于加荷轴。

在离试样边缘不小于 10mm 处的某一点上施加初负荷 $F_0$，其值为 9.8N±0.1N，调整深度指示装置至零点，然后在 2～3s 内的时间内平稳地施加试验负荷 $F_m$。

3）选择下列的试验负荷值 $F_m$：49.0N、132N、358N、981N，误差为 ±1%。

使修正框架变形后的压入深度在 0.15～0.35mm 之间。

如果 30s 压痕深度值超出范围（无论一组试样或单个试样时），需改变试验负荷以得到在规定范围内的压痕深度，应说明超出规定范围压痕深度的试验数目。

如果一组试验中试验负荷应改变，当处于转变区域时，不同试验负荷下产生的不同硬度值将难以解释，例如：当评估热老化对硬度的影响时，经双方协商一致，可扩大上述的压痕深度范围，但不能超出该值的 20%。使用这个负荷使大部分试验压痕深度落在 0.15～0.35mm 之间。

4）当按此方法进行试验时，试样中的气泡或开裂不应影响结果。如果在同一试样

上进行几次测定。各压痕点间及离开边缘距离都应不小于 10mm。

5）施加试拉负荷 $F_m$30s 后，在加荷下测量压入深度 $h_1$，其精度为 ±0.005mm。

6）在一个或多个试样上进行 10 次有效的试验。

7）仪器机架的变形 $h_2$ 应按下述步骤测定：把一块软铜板（至少 6mm 厚）放在支撑板，同时施加初负荷 $F_0$。调整指示装置至零点并施加试验负荷 $F_m$。保持试验负荷直到深度指示器稳定，记下读数，移去试验负荷同时重新调整深度指示器至零。

重复这种操作直到深度指示器读数在每次施加试验负荷时恒定为止，这就表示在该点铜块不会进一步被压入，因此该恒定的深度读数就是由于设备的框架变形而导致的深度指示器的位移量。记下该恒定的读数为 $h_2$。用 $h = h_1 - h_2$ 修正压入深度 $h$。

**3. 球压痕法硬度的测定**

1）由下式计算折合试验负荷 $F_r$：

$$F_r = F_m \times \frac{\alpha}{(h - h_r + \alpha)} = F_m \times \frac{0.21}{h - 0.25 + 0.21}$$

式中　$F_m$——压痕器上的负荷，单位为 N；

$h_r$——压入的折合深度（0.25mm）；

$h$——机架变形修正后的压入深度（$h_1 - h_2$），单位为 mm；

$\alpha$——常数（0.21）。

2）球压痕硬度由下式计算：

$$\mathrm{HB} = \frac{F_r}{\pi d h_r}$$

式中　HB——球压痕硬度值，单位为 MPa；

$F_r$——折合试验负荷，单位为 N；

$h_r$——压入的折合深度（0.25mm）；

$d$——钢球的直径（5mm）。

3）当修正的压入深度 $h$ 确定时，可利用表 3-59 直接读出 HB 的值。

**表 3-59　球压痕硬度值随压入深度和试验负荷关系表**

| 压入深度 $h$/mm | 在下列各负荷 $F_m$ 下的球压痕硬度 HB 值/MPa | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 49N | 132N | 358N | 961N |
| 0.150 | 23.82 | 64.17 | 174.04 | 467.19 |
| 0.155 | 22.79 | 61.38 | 166.47 | 446.87 |
| 0.160 | 21.84 | 58.82 | 159.54 | 428.25 |
| 0.165 | 20.96 | 56.47 | 153.15 | 411.12 |
| 0.170 | 20.16 | 54.30 | 147.26 | 395.31 |
| 0.175 | 19.41 | 52.29 | 141.81 | 380.87 |
| 0.180 | 18.72 | 50.42 | 136.75 | 367.07 |
| 0.185 | 18.07 | 48.68 | 132.03 | 354.42 |
| 0.190 | 17.47 | 47.06 | 127.63 | 342.60 |
| 0.195 | 16.91 | 45.54 | 123.51 | 331.55 |
| 0.200 | 16.38 | 44.12 | 119.65 | 321.19 |
| 0.205 | 15.88 | 42.78 | 116.03 | 311.46 |
| 0.210 | 15.41 | 41.52 | 112.61 | 302.30 |

（续）

| 压入深度 $h$/mm | 在下列各负荷 $F_m$ 下的球压痕硬度 HB 值/MPa | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 49N | 132N | 358N | 961N |
| 0.215 | 14.97 | 40.34 | 109.40 | 293.66 |
| 0.220 | 14.56 | 39.22 | 106.36 | 285.50 |
| 0.225 | 14.16 | 38.16 | 103.48 | 277.79 |
| 0.230 | 13.79 | 37.15 | 100.76 | 270.48 |
| 0.235 | 13.44 | 36.20 | 98.18 | 263.54 |
| 0.240 | 13.10 | 35.29 | 95.72 | 256.95 |
| 0.245 | 12.78 | 34.43 | 93.39 | 250.69 |
| 0.250 | 12.48 | 33.61 | 91.16 | 244.72 |
| 0.255 | 12.19 | 32.83 | 89.04 | 239.03 |
| 0.260 | 11.91 | 32.09 | 87.02 | 233.59 |
| 0.265 | 11.65 | 31.37 | 85.09 | 228.40 |
| 0.270 | 11.39 | 30.69 | 93.24 | 223.44 |
| 0.275 | 11.15 | 30.04 | 81.47 | 218.68 |
| 0.280 | 10.92 | 29.41 | 79.77 | 214.13 |
| 0.285 | 10.70 | 28.81 | 78.14 | 209.76 |
| 0.290 | 10.48 | 28.24 | 76.68 | 205.56 |
| 0.295 | 10.28 | 27.68 | 75.08 | 201.53 |
| 0.300 | 10.08 | 27.15 | 73.63 | 197.66 |
| 0.305 | 9.89 | 26.54 | 72.24 | 193.93 |
| 0.310 | 9.70 | 26.14 | 70.91 | 190.34 |
| 0.315 | 9.53 | 25.67 | 69.62 | 186.87 |
| 0.320 | 9.36 | 25.21 | 68.37 | 183.54 |
| 0.325 | 9.19 | 24.77 | 67.17 | 180.32 |
| 0.330 | 9.04 | 24.34 | 66.02 | 177.21 |
| 0.335 | 8.88 | 23.33 | 64.90 | 174.21 |
| 0.340 | 8.73 | 23.53 | 63.81 | 171.30 |
| 0.345 | 8.59 | 23.14 | 62.77 | 168.49 |
| 0.350 | 8.45 | 22.77 | 61.76 | 165.78 |

注：当试样的球压痕硬度处于一个试验负荷和另一个试验负荷之间的转换区时，以较小的试验负荷在较低的压痕深度下进行的试验，与以较大的试验负荷在较大的深度下进行试验产生的球压痕硬度稍有不同。在这种情况下，推荐使用有关各方协商一致的试验负荷。

**4. 试验结果数值的修约**

按 GB/T 8170 进行修约，对于 HB 低于 250MPa 时，修约至 1MPa；对于 HB 不低于 250MPa 时，修约至 10MPa。

## 3.14　塑料洛氏硬度测试

塑料洛氏硬度测试按照 GB/T 3398.2—2008《塑料　硬度测定　第 2 部分：洛氏硬度》进行。

## 3.14.1　试样

1）标准试样为厚度至少 6mm 的平板。其面积应满足下列要求：在试样的同一表面上作 5 次测量，每一测量点应离试样边缘 10mm 以上，任何两测量点的间隔不得少于 10mm。

试样不一定为正方形。试验后在支撑面上不应有压头的压痕。

2）当无法得到上述所规定的最小厚度的试样时，可用相同厚度的较薄试样叠成，要求每片试样的表面都应紧密接触，不得被任何形式的表面缺陷分开（例如，凹陷痕迹或锯割形成的毛边）。

3）全部压痕都应在试样的同一表面上。

4）测量洛氏硬度只需一个试样，对各向同性的材料，每一试样至少应测量 5 次。

5）当受试材料是各向异性时，应规定压痕的方向与各向异性轴的关系。当需要测定不止一个方向上的硬度值时，则应制备足够的试样，以使每个方向上至少可以测定 5 个洛氏硬度值。

## 3.14.2　试验设备

1）仪器是标准洛氏硬度计，其主要由下列部件构成：①可调工作台的刚性机架，带有直径至少为 50mm 的用于放置试样的平板；②有连接器的压头；③无冲击地将适宜负荷加在压头上的装置。

2）压头为可在轴套中自由滚动的硬质抛光钢球。该钢球在试验中不应有变形，试验后不应有损伤。压头的直径取决于所用的洛氏硬度标尺。

3）压头配有千分表或其他合适的装置，以测量压头的压入深度，精确至 0.001mm。千分表最好按洛氏硬度值标刻度数（但不是必须这样做，洛氏标尺的每一分度值为 0.002mm）。当仪器直接标刻时，千分表上通常有黑、红两种刻度，后者已自动推算 M、L 及 R 标尺洛氏硬度的常数 130。只要准确度不低于千分表，也可采用其他测量和数据显示手段。

4）所有情况下的初负荷都是 98.07N。洛氏硬度计通过丝杠将放置试样的工作台升高至试样与压头接触来施加初负荷。在这种情况下，千分表上有一个显示初负荷已经施加的指示点，在操作硬度计之前，应参阅厂商的仪器手册。调整加荷速度极为重要。调节洛氏硬度计的缓冲器，以使操作手柄在仪器上无试样时或未加荷于砧座的情况下，在 4～5s 内完成，此操作所用的主负荷应是 980.7N。

5）洛氏标尺的主负荷、初负荷及压头直径如表 3-60 所示，主负荷及初负荷都需准确到 2% 之内。

6）仪器应安装在水平、无振动的钢性基座上。若仪器台座上无法避免要受到振动的影响（例如在其他试验机的附近），则洛氏硬度计也可装在带有至少 25mm 厚的海绵橡胶衬垫的金属板上，或其他能有效减振的台座上。

**表 3-60　洛氏标尺的主负荷、初负荷及压头直径**

| 洛氏硬度标尺 | 初负荷/N | 主负荷/N | 压头直径/mm |
|---|---|---|---|
| R | 98.07 | 588.4 | 12.7 ±0.015 |
| L | 98.07 | 588.4 | 6.35 ±0.015 |
| M | 98.07 | 980.7 | 6.35 ±0.015 |
| E | 98.07 | 980.7 | 3.175 ±0.015 |

注：E 标尺仅用于校准。

7）定期用已知洛氏硬度的金属（铸铁、铝镁合金、轴承材料）标准硬度块，采用洛氏 E 标尺校准仪器。这样可以发现由于加荷装置的失灵或框架变形所引起的误差，这些误差应在仪器使用前予以校正。当仪器规定 R、L 或 M 的试验方法时，可经常按 R、L 或 M 相应测试方法所用的标准硬度块进行辅助校验。

## 3.14.3　试验内容及结果表示

**1. 状态调节**

试验前，试样应在与受试材料有关的标准所规定的环境中或在 GB/T 2918 所规定的一种环境中进行状态调节。

**2. 试验步骤**

1）除非另有规定，试验应在与状态调节相同的标准环境中进行。

2）校对主负荷、初负荷及压头直径是否与所用洛氏标尺相符合。由于手调不能使压头正确地安置在轴承座中，更换钢球后的第一次读数必须废弃。需要主负荷的全部压力才能使压头安置在轴承座中。

3）把试样放在工作台上。检查试样和压头的表面是否有灰尘、污物、润滑油及锈迹，并检查试样表面是否垂直于所施加的负荷方向。

施加初负荷且调整千分表到零。在施加初负荷后 10s 内施加主负荷。在施加主负荷后 15～16s 时卸去主负荷。应平稳操作仪器。卸去主负荷 15s 后读取千分表上读数，准确到标尺的分度值。

4）若仪器是按洛氏硬度值直接分度时，则适合于按下述方法操作：计数施加主负荷后指针通过标尺上零点的次数，将所得次数与卸去主负荷后指针通过零点的次数相减。若其差值为零，则硬度值为标尺读数加上 100。若其差值为 1，则硬度值为标尺读数，若其差值为 2，则硬度值为标尺读数减去 100。若有疑问，可查阅制造厂的仪器手册。

5）在试样的同一表面上作 5 次测量，每一测量点应离试样边缘 10mm 以上，任何两测量点的间隔不得少于 10mm。

6）理论上，洛氏硬度值应处于 50～115 之间，超出此范围的值是不准确的，应用邻近的标尺重新测定。

7）如果需要比 R 标尺更低硬度值的标尺时，则洛氏硬度试验是不适合的。

**3. 洛氏硬度测试**

测定硬度的方法是在规定的加荷时间内，在受试材料上面的钢球上施加一个恒定的

初负荷，随后施加主负荷，然后再恢复到相同的初负荷。测量结果是由压入总深度减去卸去主负荷后规定时间内的弹性恢复以及初负荷引起的压入深度。洛氏硬度由压头上的负荷从规定初负荷增加到主负荷，然后再恢复到相同初负荷时的压入深度净增量求出。

洛氏硬度标尺每一分度表示压头垂直移动 0.002mm。实际上，洛氏硬度值由下求出：

$$HR = 130 - e$$

式中　HR——洛氏硬度值；

$e$——主负荷卸除后的压入深度，以 0.002mm 为单位的数值。

此关系式仅适用于 E、M、L 和 R 标尺。

## 3.15　塑料和硬橡胶压痕硬度试验

塑料和硬橡胶压痕硬度试验按照 GB/T 2411—2008《塑料和硬橡胶　使用硬度计测定压痕硬度（邵氏硬度）》进行。

### 3.15.1　试样的制备

1）试样的厚度至少为 4mm，可以用较薄的几层叠合成所需的厚度。由于各层之间的表面接触不完全，因此，试验结果可能与单片试样所测结果不同。

2）试样的尺寸应足够大，以保证离任一边缘至少 9mm 进行测量，除非已知离边缘较小的距离进行测量所得结果相同。试样表面应平整，压座与试样接触时覆盖的区域至少离压针顶端有 6mm 的半径。应避免在弯曲的、不平或粗糙的表面上测量硬度。

### 3.15.2　试验设备

1）该试验方法采用邵氏 A 型和邵氏 D 型的硬度计。A 型和 D 型邵氏硬度计由压座、压针及指示装置构成。

2）压座，中心有一直径为 $\phi$3mm ± 0.5mm 的孔，离压座的任一边至少 6mm。

3）压针，由直径为 $\phi$1.25mm ± 0.15mm 的硬化钢制成。A 型硬度计压针的形状尺寸如图 3-26 所示，D 型硬度计压针如图 3-27 所示。

4）指示装置，可读取压针顶端伸出压座的长度，当压针全部伸出 2.50mm ± 0.04mm 时定为 0，压座和压针与平面玻璃紧密接触，伸出值为 0mm 时定为 100，方可直接读数。

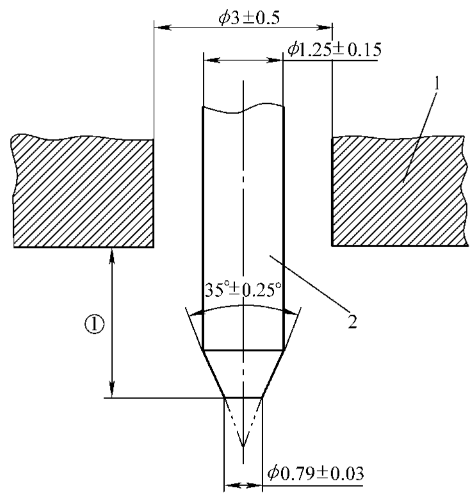



图 3-26　A 型硬度计压针

1—压座　2—压针

① 全部伸出 2.50mm ± 0.04mm。

该装置可能包括将负荷施加于压针时所获得的初始压痕的指示值，需要时可由最大值指示器读取瞬时读数的最大值。

5）已校准的弹簧，对于 A 型邵氏硬度计，施加于压针上的力按下式计算：

$$F = 550 + 75H_A$$

式中　$F$——施加的力，单位为 mN；

$H_A$——A 型硬度计硬度读数。

对于 D 型邵氏硬度计，施加于压针上的力按下式计算：

$$F = 445H_D$$

式中　$F$——施加的力，单位为 mN；

$H_D$——D 型硬度计硬度读数。

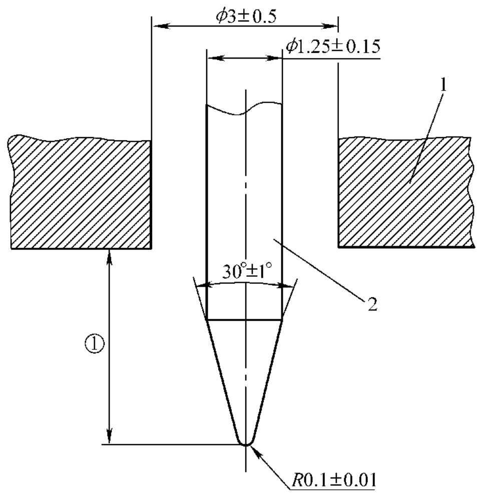



图 3-27　D 型硬度计压针

1—压座　2—压针

①全部伸出 2.50mm ±0.04mm。

6）校准硬度计的弹簧时，为防止压座和天平盘间的干扰，将硬度计垂直放置，压针顶端静置在天平盘中的一个金属垫上，如图 3-28 所示。垫片上有一个高约 2.5mm、直径约 1.25mm 的小圆杆，顶部像一小杯，可容纳压针。垫片的质量用天平的另一个秤盘上的砝码来平衡。把砝码加到秤盘上，以平衡压针在各种刻度读数时的力。测得的力值与 A 型硬度计的计算力值之差应在 ±75mN 之内，或与 D 型硬度计的计算力值之差应在 ±445mN 之内。

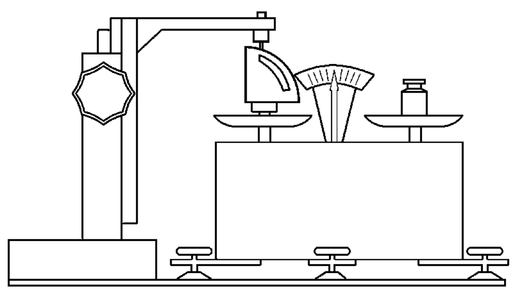


图 3-28　校准硬度计弹簧的装置

可用专门的仪器校准硬度计。用于校准的天平或仪器应能在压针顶端施加力并测量，其中 A 型硬度计在 3.9mN 以内，D 型硬度计在 19.6mN 以内。

## 3.15.3　试验结果及内容表示

### 1. 状态调节和试验环境

材料的硬度与相对湿度无关时，硬度计和试样应在试验温度下状态调节 1h 以上。对于硬度与相对湿度有关的材料，试样应按 GB/T 2918 或按相应的材料标准进行状态调节。

当硬度计由低于室温的地方移至较高温度的地方时，在转移位置前，应将其放在合适的干燥器或气密的容器中，在移入新的环境后继续保持直到硬度计的温度高于空气露点的温度。

除非相关材料标准中另有规定，试验应在 GB/T 2918 规定的一种标准环境下进行。

**2. 试验步骤**

1）将试样放在一个硬的、坚固稳定的水平平面上，握住硬度计，使其处于垂直位置，同时使压针顶端离试样任一边缘至少 9mm。立即将压座无冲击地加到试样上，使压座平行于试样并施加足够的压力，压座与试样应紧密接触。

用硬度计台或压针中心轴上加砝码的方法，将压座加到试样上，可获得最好的再现性。A 型硬度计推荐的质量是 1kg，D 型硬度计是 5kg。

15s ± 1s 后读取指示装置的示值。若规定瞬时读数，则在压座与试样紧密接触后 1s 之内读取硬度计的最大值。

2）在同一试样上至少相隔 6mm 测量 5 个硬度值，并计算其平均值。

当 A 型硬度计的示值高于 90 时，建议用 D 型硬度计进行测量；当 D 型硬度计的示值低于 20 时，建议用 A 型硬度计进行测量。

**3. 压痕硬度的测定**

在规定的测试条件下，将规定形状的压针压入试验材料，测量垂直压入的深度。

压痕硬度与相应的压入深度成反比，且依赖于材料的弹性模量和黏弹性。压针的形状、施加的力及施力时间都会影响试验结果。一种型号的硬度计与另一种型号的硬度计以及硬度计与其他测量硬度的仪器之间没有一种简单关系。

读数可以用邵氏硬度 A/15：45 的形式报告，A 是硬度计的类型，15 是 15s，它是将压座与试样紧密接触后与读数之间的时间，45 是读数值。又如，邵氏硬度 D/1：60，是指在 1s 之内读取的 D 型硬度计示值为 60，或由最大值指示器得到的读数。

## 3.16 硫化橡胶或热塑性橡胶硬度试验

硫化橡胶或热塑性橡胶硬度的测定按照 GB 6031—1998《硫化橡胶或热塑性橡胶硬度的测定（10-100IRHD)》进行。

### 3.16.1 橡胶国际硬度

**1. 橡胶国际硬度（IRHD）的定义**

橡胶国际硬度（IRHD）这样确定：当 IRHD 等于 0 时，表示材料的杨氏弹性模量为 0；当 IRHD 等于 100 时，表示材料的杨氏弹性模量为无限大。在通常情况下应满足如下条件：

1）橡胶国际硬度的增量总是近似地表示相同比例的杨氏弹性模量的增量。

2）对于高弹性橡胶，橡胶国际硬度和邵尔 A 型硬度的数值大致相同。

**2. 测定方法**

对表面平坦而且两面平行的硫化橡胶或热塑性橡胶国际硬度的四种测定方法是：①方法 N，常规试验；②方法 H，高硬度试验；③方法 L，低硬度试验；④方法 M，微型试验。对于弯曲表面表观硬度的测定也有四种方法，分别为方法 CN、CH、CL 和 CM。

这些方法的主要区别在于钢球的直径和压入力的大小，根据特定的用途选择合适的方法。每个方法的适用范围如图 3-29 所示。

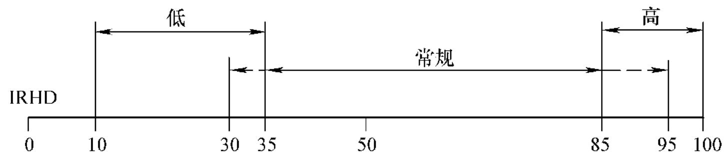



图 3-29　硬度测试的应用范围

（1）方法 N　硬度的常规试验适用于橡胶的硬度在 35～85IRHD 范围内，也可用于硬度在 30～95IRHD 范围内的橡胶。试样的厚度要求大于或等于 4mm。

（2）方法 H　适用于橡胶的硬度在 85～100IRHD 范围内，试样的厚度要求大于或等于 4mm。

（3）方法 L　适用于橡胶的硬度在 10～35IRHD 范围内，试样的厚度要求大于或等于 6 mm。在 85～95IRHD 和 30～35IRHD 范围内，用方法 N 测得的硬度值与分别用方法 H 或方法 L 获得的数据不完全一致。

（4）方法 M　硬度的微型试验法，本质上是按比例缩小的常规试验法，适用于橡胶的硬度在 35～85IRHD 范围内，也可用于硬度在 30～95IRHD 范围内，试样的厚度小于 4 mm 的橡胶。

由于橡胶的各种表面因素，例如由打磨引起的表面粗糙，致使微型试验与常规试验所测的结果出现差异。

方法 CN、CH、CL、和 CM 是弯曲表面的表观硬度试验，是试验的橡胶为弯曲的情况下，对方法 N、H、L 和 M 的修改。主要存在两种情况：

1）试验的试样和制品足够大，使硬度计能安放在上面。

2）试验的试样和制品及硬度计都很小，使它们能安放在普通的支座上，或者能将试样安放在硬度计的试样台上。

上述方法不能保证适用于所有类型和尺寸的试样，但包括了像 O 形圈这样一些最普通的类型。

**3. 标准硬度**（用 S 表示）

标准硬度指使用方法 N、H、L 和 M 规定的程序，用标准厚度和不小于规定的最小横向尺寸的试样测得的硬度。橡胶国际硬度值取整数位。

**4. 表观硬度**

表观硬度指使用方法 N、H、L 和 M 规定的程序，用非标准试样，以及使用方法 CN、CH、CL 和 CM 测得的硬度。橡胶国际硬度取整数位。

用方法 CN、CH、CL 和 CM 测得的值总是给出表观硬度，因为试验通常在橡胶厚度有所变化的整个制品上进行，而且在多数情况下，横向尺寸不能保证压足与边缘之间的最小距离，因此测得的数值通常与用方法 N、H、L 和 M 在标准试样上，或在相同厚度的制品的平坦表面上所测得的数值不一致。另外，测出的硬度值还与制品的支承方法和是否使用了压足有关。

在弯曲表面上测得的结果，仅适用于特殊形状、特殊尺寸的试样或制品，以及特殊的支承方式等。同标准硬度值相比可相差 10IRHD 左右。此外，经打磨的表面或用其他方法除去布纹的表面，与光滑的模压表面相比，得到的硬度值将稍有不同。

## 3.16.2　试样

**1. 方法 N、H、L 和 M**

1）试样的上、下表面应是平整、光滑和相互平行的，对比试验应在相同厚度的试样上进行。

2）试样的厚度要求：①方法 N 和 H，标准试样的厚度应为 8 ~ 10mm，而且可以由一层、两层或三层叠放的橡胶组成，其最薄的橡胶层应不小于 2mm，非标准试样可以稍厚些或者稍薄些，但不能小于 4mm；②方法 L，标准试样的厚度为 10 ~ 15mm，而且可以由一层、两层或三层叠放的橡胶组成，其最薄的橡胶层不应小于 2mm，非标准试样可以稍厚些或者稍薄些，但不能小于 6mm；③方法 M，标准试样的厚度应为 2mm ± 0.5mm，可以使用厚些或薄些的试样，但不能小于 1mm，用这样的试样测得的结果与标准试样所测的结果不能进行比较。

3）试样横向尺寸的要求：①方法 N、H 和 L，标准试样和非标准试样的横向尺寸应使试验点与试样边缘的距离不小于表 3-61 的规定；②方法 M，横向尺寸应使试验点与试样边缘的距离不小于 2mm，试样厚度大于 4mm，但由于横向尺寸或平面部分的面积所限，不宜在常规试验仪器上试验而用微型仪器试验时，试验点应距离试样边缘尽可能远一些。

**表 3-61　试验点与试样边缘的最小距离**

| 试样的总厚度/mm | 试验点与试样边缘的最小距离/mm |
|---|---|
| 4 | 7.0 |
| 6 | 8.0 |
| 8 | 9.0 |
| 10 | 10.0 |
| 15 | 11.5 |
| 25 | 13.0 |

**2. 方法 CN、CH、CL 和 CM**

试样应是一个完整的制品或者是从制品上切下的一部分。切下的试样下面应能够在硬度试验期间内被正常支承住。如果试样的表面有布纹，应打磨后再进行试验，试样在打磨后应在标准温度下恢复至少 16h，而且按进行环境调节，调节期可以作为恢复期的一部分。

## 3.16.3　试验设备

**1. 方法 N、H、L 和 M**

仪器主要部件的尺寸和作用力如表 3-62 所示。

**表 3-62　仪器主要部件的尺寸和作用力**

| 试验 | 直径/mm | 钢球作用力 | | | 压足上的力/N |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 接触力/N | 压入力/N | 总力/N | |
| 方法 N<br>（常规试验） | 球 2.5±0.01<br>压足 20±1<br>孔 6±1 | 0.30±0.02 | 5.40±0.01 | 5.70±0.03 | 8.3±1.5 |
| 方法 H<br>（高硬度） | 球 1.00±0.01<br>压足 20±1<br>孔 6±1 | 0.30±0.02 | 5.40±0.01 | 5.70±0.03 | 8.3±1.5 |
| 方法 L<br>（低硬度） | 球 5.00±0.01<br>压足 22±1<br>孔 10±1 | 0.30±0.02 | 5.40±0.01 | 5.70±0.03 | 8.3±1.5 |
| 方法 M<br>（微型试验） | 球 0.395±0.005<br>压足 3.35±0.15<br>孔 1.00±0.15 | 接触力/mN | 压入力/mN | 总力/mN | 压足上的力/mN |
| | | 8.3±0.5 | 145±0.5 | 153.3±1.0 | 235±30 |

1）压杆和压杆的支承装置。可垂直移动压杆的下端是一个钢球或球形表面。压杆的支承装置可使其在施加接触力之前，钢球下端部稍高于环形压足的基准面。

2）对压杆施加接触力和压入力的装置。作用力包括压杆和与其相连的附件重力，以及一切可能作用于压杆的弹簧力，以使其实际加于压杆球端的力符合表 3-61 的规定。

3）测量由压入力产生的压杆压入深度增量的装置，以长度单位表示，或者直接读出橡胶国际硬度 IRHD。该测量装置可以是机械的、光学的或电学的。

4）扁平环形压足，垂直于压杆轴线，并有一个使压杆通过的同心圆孔。压足放在试样上，并对其施加 30kPa±5kPa 的压力，施加在压足上的总压力不应超过表 3-61 中规定的值。压足与测量压入深度的装置为刚性连接。这样测出的位移才是压杆相对于压足（即试样的上表面）的位移，而不是压杆相对于支承试样的表面的位移。

在微型试验中，当使用借助弹簧向上顶推试样台的仪器时，压足上的压力值和压足上的作用力在施加总压力的过程中都是起作用的，在施加 145mN 压入力之前，压足上的作用力大于此值，即等于 380mN±30mN。

5）硬度计的轻微振动装置（例如电动蜂鸣器）用以克服任何轻微的摩擦力（在完全消除了摩擦力的仪器上可以省去）。

6）试样配有恒温箱，试样在非标准温度下试验时所用。该恒温箱应安装一个控制温度的装置，使其将温度控制在所需温度 ±2℃ 范围内。压足和垂直压杆应穿过恒温箱顶部，穿过顶部的部分由低热导率的材料制成，测量温度的敏感元件应安装在恒温箱内靠近试样或安放试样的地方。

**2. 方法 CN、CH、CL 和 CM**

所用仪器基本上是方法 N、H、L 和 M 中所描述的，但有以下几点不同：

1）半径大于 50mm 的圆柱形表面，仪器的底部应在压杆下面有小孔，使环形压足自由通过，这样一来在底座的上、下均可进行测量。底座的下表面应为两个相互平行并

与底座平面平行的圆柱体形状。圆柱的直径和它们相隔的距离应能使仪器固定并支承在被试验的弯曲表面上，或者经改进的底座可以安装上带万向节的可动压足，以便使它们适用于弯曲面。

2）大于 50mm 大半径的双弯曲的表面，应使用 1）中规定的带可调压足的仪器。

3）半径为 4～50mm 的圆柱面或双弯曲的小试样，如果表面太小不能支承仪器，则试样或制品应由专用夹具或 V 形模具的装置固定，以便使压足垂直地压在试验表面上。也可以用蜡把小试样凝固在试样台上。

通常情况下，用于方法 M 的仪器仅适用于橡胶厚度小于4mm 的试样。用于方法 M，借助弹簧向上顶推试样台的仪器，不适用于大的试样或具有大弯曲半径的制品。

4）小 O 形圈和小于 4mm 弯曲半径的制品，这些试样应固定在合适的夹具或模具上，或者用蜡凝固在试样台上，应使用方法 M 所用的仪器测量。如果半径小于 0.8mm，则不能进行试验。

## 3.16.4　试验内容及结果表示

**1. 硫化和试验之间的时间间隔**

除非技术原因另有规定外，应遵守下列要求：

1）在进行常规试验时，硫化和试验之间的最短时间应为 16h。在进行仲裁试验时，最短时间应为 72h。

2）在进行非制品试验时，硫化和试验间的最长时间为 4 个星期。在进行对比评价试验时，试验应尽可能经相同的时间间隔后进行。

3）在进行制品试验，只要有可能，硫化和试验间的时间间隔应不超过 3 个月。在其他情况下，试验应在使用方收到制品后两个月内进行。

**2. 试样的调节**

1）当试验在标准温度下进行时，试样在试验前应在这一试验条件下至少调节 3h。

2）当试验在较高或较低的温度进行时，试样应在试验环境中放置一段时间，使之足以达到与试验环境的温度相平衡，或按所试材料或制品的技术要求规定的时间放置，然后立即试验。

**3. 试验温度**

试验通常应在标准温度下进行（见 GB/T 2941）。当采用其他温度时，应从 GB/T 2941 所规定的优选温度中挑选温度。

**4. 试验步骤**

1）按规定调节试样。在试样的上、下表面撒上薄薄的滑石粉，把试样放在一水平刚性支承表面上，放下压足与试样表面接触。使压杆和压球在橡胶上保持 5s，这时球上的压力为接触力。

2）如果硬度计以橡胶国际硬度（IRHD）分度，它应在 5s 后，调整到读数为 100；然后应施加压入力并保持 30s，这时可直接测得橡胶国际硬度值。

3）如果硬度计以长度单位分度，应记下施加压入力 30s 后引起的压杆压入深度值 $D$（0.01mm 为单位）。在采用微型试验时，这个值应乘以刻度系数 6，再利用表 3-63～

表 3-65 或由这些表绘制的曲线换算成橡胶国际硬度值。

4）在施加负荷期间，除非仪器完全消除了摩擦，否则都应轻微振动仪器。

**表 3-63　方法 N 所用的 *D* 值与橡胶国际硬度值（IRHD）的换算**

| *D* | IRHD | *D* | IRHD | *D* | IRHD | *D* | IRHD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 100.0 | 46 | 73.3 | 92 | 51.6 | 138 | 38.2 |
| 1 | 100.0 | 47 | 72.7 | 93 | 51.2 | 139 | 38.0 |
| 2 | 99.9 | 48 | 72.2 | 94 | 50.9 | 140 | 37.8 |
| 3 | 99.8 | 49 | 71.6 | 95 | 50.5 | 141 | 37.5 |
| 4 | 99.6 | 50 | 71.0 | 96 | 50.2 | 142 | 37.3 |
| 5 | 99.3 | 51 | 70.4 | 97 | 49.8 | 143 | 37.1 |
| 6 | 99.0 | 52 | 69.8 | 98 | 49.5 | 144 | 36.9 |
| 7 | 98.6 | 53 | 69.3 | 99 | 49.1 | 145 | 36.7 |
| 8 | 98.1 | 54 | 68.7 | 100 | 48.8 | 146 | 36.5 |
| 9 | 97.7 | 55 | 68.2 | 101 | 48.5 | 147 | 36.2 |
| 10 | 97.1 | 56 | 67.6 | 102 | 48.1 | 148 | 36.0 |
| 11 | 96.5 | 57 | 67.1 | 103 | 47.8 | 149 | 35.8 |
| 12 | 95.9 | 58 | 66.6 | 104 | 47.5 | 150 | 35.6 |
| 13 | 95.3 | 59 | 66.0 | 105 | 47.1 | 151 | 35.4 |
| 14 | 94.7 | 60 | 65.5 | 106 | 46.8 | 152 | 35.2 |
| 15 | 94.0 | 61 | 65.0 | 107 | 46.5 | 153 | 35.0 |
| 16 | 93.4 | 62 | 64.5 | 108 | 46.2 | 154 | 34.8 |
| 17 | 92.7 | 63 | 64.0 | 109 | 45.9 | 155 | 34.6 |
| 18 | 92.0 | 64 | 63.5 | 110 | 45.6 | 156 | 34.4 |
| 19 | 91.3 | 65 | 63.0 | 111 | 45.3 | 157 | 34.2 |
| 20 | 90.6 | 66 | 62.5 | 112 | 45.0 | 158 | 34.0 |
| 21 | 89.8 | 67 | 62.0 | 113 | 44.7 | 159 | 33.8 |
| 22 | 89.2 | 68 | 61.5 | 114 | 44.4 | 160 | 33.6 |
| 23 | 88.5 | 69 | 61.1 | 115 | 44.1 | 161 | 33.4 |
| 24 | 87.8 | 70 | 60.6 | 116 | 43.8 | 162 | 33.2 |
| 25 | 87.1 | 71 | 60.1 | 117 | 43.5 | 163 | 33.0 |
| 26 | 86.4 | 72 | 59.7 | 118 | 43.3 | 164 | 32.8 |
| 27 | 85.7 | 73 | 59.2 | 119 | 43.0 | 165 | 32.6 |
| 28 | 85.0 | 74 | 58.8 | 120 | 42.7 | 166 | 32.4 |
| 29 | 84.3 | 75 | 58.3 | 121 | 42.5 | 167 | 32.3 |
| 30 | 83.6 | 76 | 57.9 | 122 | 42.2 | 168 | 32.1 |
| 31 | 82.9 | 77 | 57.5 | 123 | 41.9 | 169 | 31.9 |
| 32 | 82.2 | 78 | 57.0 | 124 | 41.7 | 170 | 31.7 |
| 33 | 81.5 | 79 | 56.6 | 125 | 41.4 | 171 | 31.6 |
| 34 | 80.9 | 80 | 56.2 | 126 | 41.1 | 172 | 31.4 |
| 35 | 80.2 | 81 | 55.8 | 127 | 40.9 | 173 | 31.2 |
| 36 | 79.5 | 82 | 55.4 | 128 | 40.6 | 174 | 31.1 |
| 37 | 78.9 | 83 | 55.0 | 129 | 40.4 | 175 | 30.9 |
| 38 | 78.2 | 84 | 54.6 | 130 | 40.1 | 176 | 30.7 |
| 39 | 77.6 | 85 | 54.2 | 131 | 39.9 | 177 | 30.5 |
| 40 | 77.0 | 86 | 53.8 | 132 | 39.6 | 178 | 30.4 |
| 41 | 76.4 | 87 | 53.4 | 133 | 39.4 | 179 | 30.2 |
| 42 | 75.8 | 88 | 53.0 | 134 | 39.1 | 180 | 30.0 |
| 43 | 75.2 | 89 | 52.7 | 135 | 38.9 | | |
| 44 | 74.5 | 90 | 52.3 | 136 | 38.7 | | |
| 45 | 73.9 | 91 | 52.0 | 137 | 38.4 | | |

注：*D* 为不同的压入深度（以 0.01mm 表示），钢球的直径为 2.5mm。

**表 3-64　方法 H 所用的 D 值与橡胶国际硬度值（IRHD）的换算**

| *D* | IRHD | *D* | IRHD | *D* | IRHD |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 100.0 | 15 | 97.3 | 30 | 91.1 |
| 1 | 100.0 | 16 | 97.0 | 31 | 90.7 |
| 2 | 100.0 | 17 | 96.6 | 32 | 90.2 |
| 3 | 99.9 | 18 | 96.2 | 33 | 89.7 |
| 4 | 99.9 | 19 | 95.8 | 34 | 89.3 |
| 5 | 99.8 | 20 | 95.4 | 35 | 88.8 |
| 6 | 99.6 | 21 | 95.0 | 36 | 88.4 |
| 7 | 99.5 | 22 | 94.6 | 37 | 87.9 |
| 8 | 99.3 | 23 | 94.2 | 38 | 87.5 |
| 9 | 99.1 | 24 | 93.8 | 39 | 87.0 |
| 10 | 98.8 | 25 | 93.4 | 40 | 86.6 |
| 11 | 98.6 | 26 | 92.9 | 41 | 86.1 |
| 12 | 98.3 | 27 | 92.5 | 42 | 85.7 |
| 13 | 98.0 | 28 | 92.0 | 43 | 85.3 |
| 14 | 97.5 | 29 | 91.6 | 44 | 84.8 |

注：*D* 为不同的压入深度（以 0.01mm 表示），钢球的直径为 1mm。

**表 3-65　方法 L 所用的 D 值与橡胶国际硬度值（IRHD）的换算**

| *D* | IRHD | *D* | IRHD | *D* | IRHD |
|---|---|---|---|---|---|
| 110 | 34.9 | 180 | 21.3 | 250 | 14.1 |
| 112 | 34.4 | 182 | 21.1 | 252 | 14.0 |
| 114 | 33.9 | 184 | 20.8 | 254 | 13.8 |
| 116 | 33.4 | 186 | 20.6 | 256 | 13.7 |
| 118 | 32.9 | 188 | 20.3 | 258 | 13.5 |
| 120 | 32.4 | 190 | 20.1 | 260 | 13.4 |
| 122 | 31.9 | 192 | 19.8 | 262 | 13.3 |
| 124 | 31.4 | 194 | 19.6 | 264 | 13.1 |
| 126 | 30.9 | 196 | 19.4 | 266 | 13.0 |
| 128 | 30.4 | 198 | 19.2 | 268 | 12.8 |
| 130 | 30.0 | 200 | 18.9 | 270 | 12.7 |
| 132 | 29.6 | 202 | 18.7 | 272 | 12.6 |
| 134 | 29.2 | 204 | 18.5 | 274 | 12.5 |
| 136 | 28.8 | 206 | 18.3 | 276 | 12.3 |
| 138 | 28.4 | 208 | 18.0 | 278 | 12.2 |
| 140 | 28.0 | 210 | 17.8 | 280 | 12.1 |
| 142 | 27.6 | 212 | 17.6 | 282 | 12.0 |
| 144 | 27.2 | 214 | 17.4 | 284 | 11.8 |
| 146 | 26.8 | 216 | 17.2 | 286 | 11.7 |
| 148 | 26.4 | 218 | 17.0 | 288 | 11.6 |
| 150 | 26.1 | 220 | 16.8 | 290 | 11.5 |
| 152 | 25.7 | 222 | 16.6 | 292 | 11.4 |
| 154 | 25.4 | 224 | 16.4 | 294 | 11.3 |
| 156 | 25.0 | 226 | 16.2 | 296 | 11.2 |
| 158 | 24.7 | 228 | 16.0 | 298 | 11.1 |
| 160 | 24.4 | 230 | 15.8 | 300 | 11.0 |
| 162 | 24.1 | 232 | 15.6 | 302 | 10.9 |
| 164 | 23.8 | 234 | 15.4 | 304 | 10.8 |
| 166 | 23.5 | 236 | 15.3 | 306 | 10.6 |
| 168 | 23.1 | 238 | 15.1 | 308 | 10.5 |
| 170 | 22.8 | 240 | 14.9 | 310 | 10.4 |
| 172 | 22.5 | 242 | 14.8 | 312 | 10.3 |
| 174 | 22.2 | 244 | 14.6 | 314 | 10.2 |
| 176 | 21.9 | 246 | 14.4 | 316 | 10.1 |
| 178 | 21.6 | 248 | 14.3 | 318 | 9.9 |

注：*D* 为不同的压入深度（以 0.01mm 表示），钢球的直径为 5mm。

**5. 压痕硬度的测定**

该硬度试验是测量钢球在一个小的接触力和一个大的总力作用下压入橡胶的深度差。当采用微型试验时，用刻度系数 6 乘以这个差值。橡胶国际硬度由表 3-63 ~ 表3-65 或由这些表绘制的曲线获得，或者由以橡胶国际硬度为单位的刻度盘直接读数。这些曲线由以下给出的压入深度与硬度之间的经验关系得到。

不同的压入深度和用国际硬度表示的硬度之间存在一定的关系，其根据如下：

1）对于完全弹性的各向同性材料，压入深度 $D$（以 0.01mm 为单位）和杨氏弹性模量 $E$（以 MPa 为单位）之间的已知关系是：

$$\frac{F}{E}=0.0038r^{0.65}D^{1.35}$$

式中　$F$——压入力，单位为 N；

$r$——钢球的半径，单位为 mm。

2）用正态误差积分曲线把 lg$E$ 和橡胶国际硬度联系起来，如图 3-30 ~ 图 3-32 所示。此曲线表明两点：①相应于曲线中点 lg$E$ 的值等于 0.364MPa；②曲线的最大斜率等于 57IRHD/lg$E$ 单位增量。

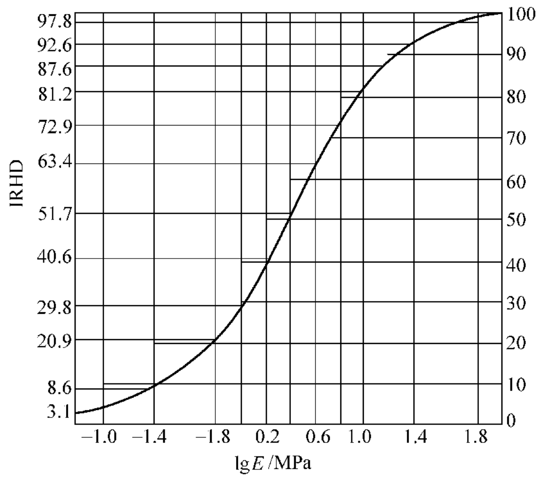



图 3-30　lg$E$ 和国际硬度（3 ~ 100IRHD）之间的关系

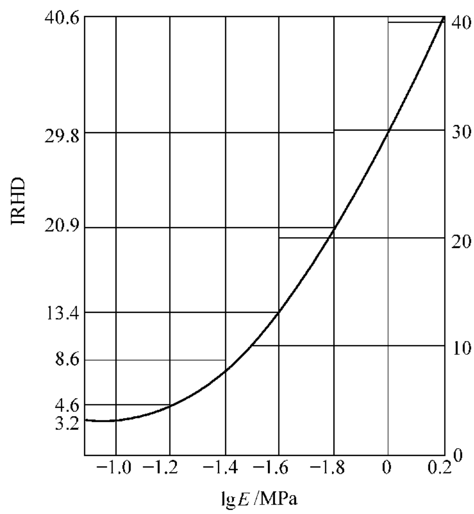



图 3-31　lg$E$ 和国际硬度（3 ~ 40IRHD）之间的关系

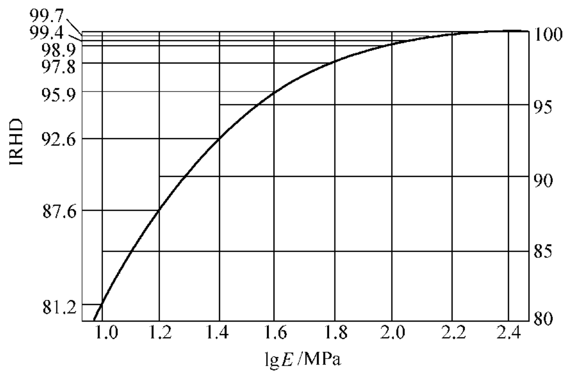



图 3-32　lgE 和国际硬度（80～1000IRHD）之间的关系

## 3.17　硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度（邵氏硬度计法）试验

硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度（邵氏硬度计法）试验按照 GB/T 531.1—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶　压入硬度试验方法　第 1 部分：邵氏硬度计法（邵尔硬度）》进行。

该试验规定了硫化橡胶或热塑性橡胶使用下列标尺的压入硬度（邵氏硬度）试验方法：

1）A 标尺，适用于普通硬度范围，采用 A 标尺的硬度计称邵氏 A 型硬度计。

2）D 标尺，适用于高硬度范围，采用 D 标尺的硬度计称邵氏 D 型硬度计。

3）AO 标尺，适用于低硬度橡胶和海绵，采用 AO 标尺的硬度计称邵氏 AO 型硬度计。

4）AM 标尺，适用于普通硬度范围的薄样品，采用 AM 标尺的硬度计称邵氏 AM 型硬度计。

### 3.17.1　试样

**1. 厚度**

1）使用邵氏 A 型、D 型和 AO 型硬度计测定硬度时，试样的厚度不小于 6mm。

2）使用邵氏 AM 型硬度计测定硬度时，试样的厚度不小于 1.5mm。

3）对于厚度小于 6mm 和 1.5mm 的薄片，为得到足够的厚度，试样可以由不多于 3 层叠加而成。对于邵氏 A 型、D 型和 AO 型硬度计，叠加后试样总厚度不小于 6mm；对于 AM 型，叠加后试样总厚度不小于 1.5mm。但由叠层试样测定的结果和单层试样测定的结果不一定一致。

**2. 表面**

1）试样尺寸的另一要求是具有足够的面积，使邵氏 A 型、D 型硬度计的测量位置距离任一边缘分别不小于 12mm，AO 型不小于 15mm，AM 型不小于 4.5mm。

2）试样的表面在一定范围内应平整，上下平行，以使压足能和试样在足够面积内进行接触。邵氏 A 型和 D 型硬度计接触面半径不小于 6mm，AO 型不小于 9mm，AM 型不小于 2. 2mm。

3）采用邵氏硬度计一般不能在弯曲、不平和粗糙的表面获得满意的测量结果，然而它们也有特殊应用，比如 ISO 7267-2 适用于橡胶覆盖胶滚筒的表观硬度测定。对这些特殊应用的局限性应有清晰的认识。

## 3. 17. 2　试验设备

**1. A 型、D 型和 AO 型**

（1）压足　A 型和 D 型的压足直径为 $\phi$18mm ± 0. 5mm 并带有 $\phi$3mm ± 0. 1mm 中孔，AO 型的压足面积至少为 500mm$^2$，带有 $\phi$5. 4mm ± 0. 2mm 中孔，中孔尺寸允差和压足大小的要求仅适用于在支架上使用的硬度计。

（2）压针　A 型、D 型压针采用直径为 $\phi$1. 25mm ± 0. 15mm 的硬质钢棒制成，其形状分别如图 3-33 和图 3-34 所示。AO 型压针为半径 *sR*2. 5mm ± 0. 02 mm 的球面，其形状如图 3-35 所示。

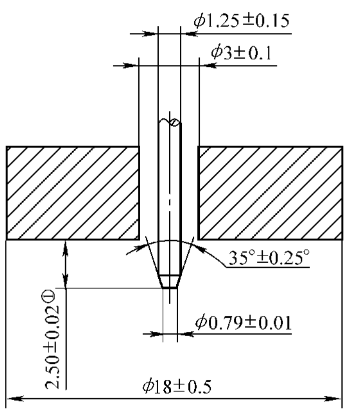



图 3-33　邵氏 A 型硬度计压针

① 压针伸出量对应硬度计读数为 0。

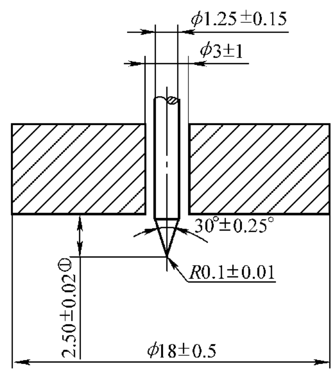



图 3-34　邵氏 D 型硬度计压针

① 压针伸出量对应硬度计读数为 0。

（3）指示机构　指示机构用于读出压针末端伸出压足表面的长度，并用硬度值表示出来。指示机构的示值范围可以通过下述方法进行校准：在压针最大伸出量为 2. 50mm ± 0. 02mm 时硬度指示值为 0，把压足和压针紧密接触合适的硬质平面，压针伸出量为 0 时硬度指示值为 100。

**2. AM 型**

AM 型硬度计除含有 A 型、D 型和 AO 型的零部件，其要求如下：

（1）压足　压足直径为 $\phi$9mm ± 0. 3mm 并带有 $\phi$1. 19mm ± 0. 03mm 中孔。

（2）压针　压针采用直径为 $\phi$0. 79 mm ± 0. 025mm 的硬质圆棒制成，其形状如图 3-36所示。

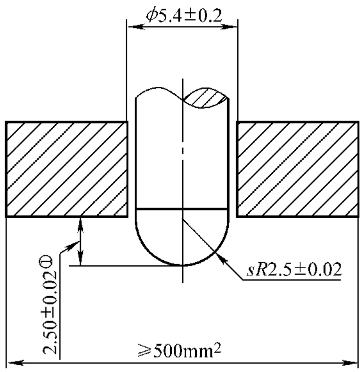



图 3-35　邵氏 AO 型硬度计压针
① 压针伸出量对应硬度计读数为 0。

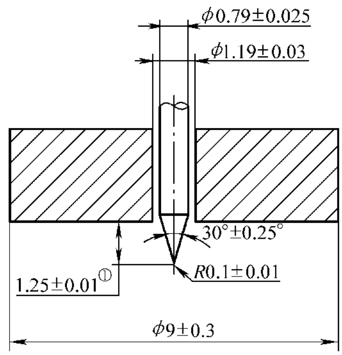



图 3-36　邵氏 AM 型硬度计压针
① 压针伸出量对应硬度计读数为 0。

（3）指示机构　指示机构用于读出压针末端伸出压足表面的长度，并用硬度值表示出来。指示机构的示值范围可以通过下述方法进行校准：在压针最大伸出量为 1.25mm ±0.01mm 时硬度指示值为 0，把压足和压针紧密接触合适的硬质平面，压针伸出量为 0 时硬度指示值为 100。

（4）支架　使用支架可提高测量准确度，通过支架在压针中轴上的砝码加力，使压足压在试样上。邵氏 A 型、D 型和 AO 型硬度计既可以和便携式硬度计一样用手直接使用，也可以安装在支架上使用。邵氏 AM 型硬度计只能安装在支架上使用。

## 3.17.3　试验内容及结果表示

**1. 邵氏硬度计的原理和选择**

邵氏硬度计的测量原理是在特定的条件下把特定形状的压针压入橡胶试样而形成压入深度，再把压入深度转换为硬度值。

使用邵氏硬度计，标尺的选择如下：

1）D 标尺值低于 20 时，选用 A 标尺。

2）A 标尺值低于 20 时，选用 AO 标尺。

3）A 标尺值高于 90 时，选用 D 标尺。

4）薄样品（样品厚度小于 6mm）选用 AM 标尺。

**2. 邵氏硬度计弹簧试验力的校准**

邵氏硬度计弹簧试验力的校准如表 3-66 所示。

**表 3-66　邵氏硬度计弹簧试验力的校准**

| 邵氏硬度计指示值 | 弹簧试验力/mN | | |
|---|---|---|---|
| | AM 型 | A 型、AO 型 | D 型 |
| 0 | 324 | 550 | — |
| 10 | 368 | 1300 | 4450 |
| 20 | 412 | 2050 | 8900 |
| 30 | 456 | 2800 | 13350 |

（续）

| 邵氏硬度计指示值 | 弹簧试验力/mN | | |
|---|---|---|---|
| | AM 型 | A 型、AO 型 | D 型 |
| 40 | 500 | 3550 | 17800 |
| 50 | 544 | 4300 | 22250 |
| 60 | 588 | 5050 | 26700 |
| 70 | 632 | 5800 | 31150 |
| 80 | 676 | 6550 | 35600 |
| 90 | 720 | 7300 | 40050 |
| 100 | 764 | 8050 | 44500 |
| 单位硬度值的弹簧试验力 | 4.4 | 75 | 445 |
| 校准允差 | ±8.8 | ±37.5 | ±222.5 |

**3. 试样的调节**

在进行试验前，试样应按照 GB/T 2941 的规定在标准实验室温度下调节至少 1h，用于比较目的的单一或系列试验应始终采用相同的温度。

**4. 试验步骤**

1）将试样放在平整、坚硬的表面上，尽可能快速地将压足压到试样上或反之把试样压到压足上，应没有振动，保持压足和试样表面平行，以使压针垂直于橡胶表面。当使用支架操作时，最大速度为 3.2mm/s。

2）按规定施加弹簧试验力使压足和试样表面紧密接触。当压足和试样紧密接触后，在规定的时刻读数。对于硫化橡胶标准弹簧试验力保持时间为 3s，热塑性橡胶则为 15s。

如果采用其他的试验时间，应在试验报告中说明，未知类型橡胶当做硫化橡胶处理。

3）在试样表面不同位置进行 5 次测量取中值。对于邵氏 A 型、D 型和 AO 型硬度计，不同测量位置两两相距至少 6mm，对于 AM 型，至少相距 0.8mm。

**5. 邵氏硬度的测定**

1）邵氏 A 型硬度计的示值按下式计算：

$$H_A = (F - 550)/75$$

式中　$H_A$——邵氏 A 型硬度计读数；

$F$——在压针上施加的弹簧试验力，单位为 mN。

2）邵氏 D 型硬度计的示值按下式计算：

$$H_D = F/455$$

式中　$H_D$——邵氏 D 型硬度计读数；

$F$——在压针上施加的弹簧试验力，单位为 mN。

3）邵氏 AO 型硬度计的示值按下式计算：

$$H_{AO} = (F - 550)/75$$

式中　$H_{AO}$——邵氏 AO 型硬度计读数；

$F$——在压针上施加的弹簧试验力，单位为 mN。

4）邵氏 AM 型硬度计的示值按下式计算：

$$H_{AM} = (F - 324)/4.4$$

式中　$H_{AM}$——邵氏 AM 型硬度计读数；

$F$——在压针上施加的弹簧试验力，单位为 mN。

邵氏 A 型、D 型、AO 型和 AM 型硬度计测量结果分别用 ShoreA、ShoreD、ShoreAO 和 ShoreAM 单位表示。

## 3.18　摩擦材料洛氏硬度试验

摩擦材料洛氏硬度试验按照 GB/T 5766—2007《摩擦材料洛氏硬度试验方法》进行。

### 3.18.1　试样

试样为整件摩擦材料制品，也可供需双方协商裁取其中一部分。试样的受试表面不允许有影响试验结果的缺陷。

试样厚度应保证在试验时不得使其压痕表面产生裂纹或背面变形。

试样状态调节：在干燥器内放置 24h 以上。

汽车用摩擦材料硬度测量点的位置选择如图 3-37 ~ 图 3-39 所示。

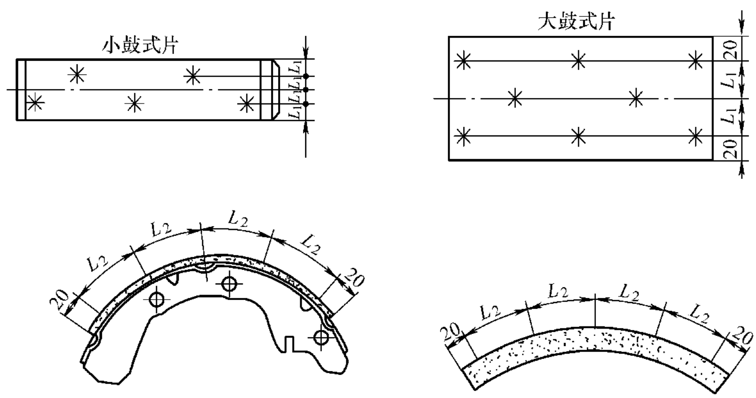



图 3-37　鼓式制动器衬片

* —测量点位置　$L_1$、$L_2$—测量点在试样上分布距离

### 3.18.2　试验设备

洛氏硬度计，试样托座（根据样品形状选用相应的试样托座，试验样品和试样托座应保持紧密贴合）。

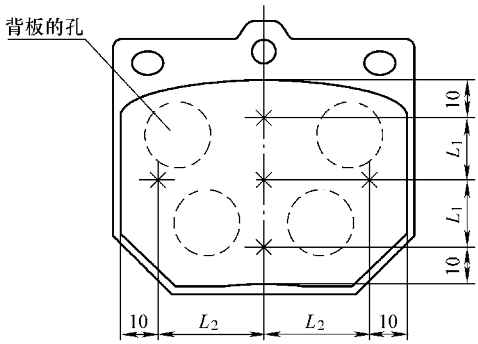



图 3-38　盘式制动器衬片

* —测量点位置　$L_1$、$L_2$—测量点在试样上分布距离

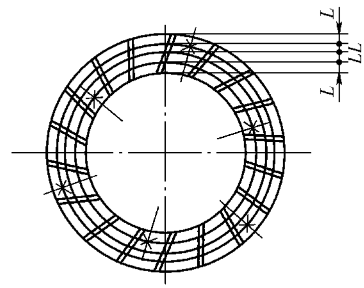



图 3-39　离合器面片

* —测量点位置　$L$—测量点在试样上分布距离

## 3.18.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

试验应在温度 23℃ ±2℃、相对湿度 50% ±5% 的条件下进行。

根据摩擦材料的软硬程度选择适宜的标尺，应使洛氏硬度值在 50～115 范围内。R 标尺适用于软的摩擦材料，P 标尺适用于硬的摩擦材料。如果一种摩擦材料按两种标尺来进行试验所得的硬度值都处在限值内，则宜选用较小硬度值的标尺。对相同材质的摩擦材料，应采用同一标尺。

硬度计要安放在水平台上，压头主轴应垂直于试样表面，钢球在压头轴磁孔中应能自由滑动，且要求洁净无缺陷。

试样托座与硬度计试样台应紧密贴合，试样托座支承面与硬度计试样台应洁净。

**2. 硬度的测定**

表示洛氏硬度钢球直径和试验力的组合符号如表 3-67 所示。

**表 3-67　洛氏硬度标尺**

| 初试验力/N | 主试验力/N | 总试验力/N | 标尺 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 钢球直径/mm | |
| | | | 6.350 | 12.700 |
| 98.07 | 490.3 | 588.4 | L | R |
| | 882.6 | 980.7 | M | S |
| | 1373 | 1471 | P | V |

用规定的钢球压头，在规定的条件下，对摩擦材料制品表面先后施加初试验力和主试验力，然后卸除主试验力，保留初试验力。用前后两次初试验力作用下的钢球压头压入深度残余增量 $e$ 求得的值，即为洛氏硬度值，$e$ 的单位为 0.002mm。

洛氏硬度 HR = 130 − $e$。

## 3.19　烧结金属摩擦材料表观硬度试验

烧结金属摩擦材料表观硬度试验按照 GB/T 9097.1—2002《烧结金属材料（不包括硬质合金）表观硬度的测定　第一部分：截面硬度基本均匀的材料》进行。

### 3.19.1　试样

1）试样的试验面应制成光滑平面，不应有氧化皮及外来污物，使压痕边缘足够清晰，以保证测量压痕直径的准确性。

2）试样厚度应不小于压痕深度的 8 倍。对于带芯板的烧结金属摩擦片，摩擦材料层厚度应不小于压痕深度的 5 倍。

### 3.19.2　试验设备

试验设备应符合 GB/T 231.1 的有关规定。

### 3.19.3　试验内容及结果表示

1）钢球直径、试验力、试验力保持时间应根据试样预期硬度和厚度按表 3-68 选择。

**表 3-68　试验参数要求**

| 布氏硬度范围 HBS | 试样厚度/mm | $F$ 与 $D$ 的相互关系 ($0.102F/D^2$) | 钢球直径 $D$/mm | 试验力 $F$/N | 试验力保持时间/s |
|---|---|---|---|---|---|
| >130 | 3～6<br>2～4<br><3 | 30 | 10.0<br>5.0<br>2.5 | 29420<br>7355<br>1839 | 30 |
| 36～130 | 3～9<br>3～6<br><3 | 10 | 10.0<br>5.0<br>2.5 | 9807<br>2452<br>612.9 | 30 |
| 18～70 | 3～6 | 5 | 2.5 | 306.5 | 30 |
| 8～35 | >6<br>3～6<br><3 | 2.5 | 10.0<br>5.0<br>2.5 | 2452<br>612.9<br>153.2 | 60 |

2）必须保证试验力作用方向与试验面垂直，试验过程中应平稳均匀地施加试验力，不得有冲击和振动。

3）压痕中心距试样边缘的距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍，相邻两个压痕的中心距不应小于压痕平均直径的 4 倍。试样的硬度小于 35HBS 时，上述距离应分别为压痕平均直径的 3 倍和 6 倍。

4）试验后，试样边缘或其背面若有变形痕迹，则试验无效。此时应选用较小的试验力及相应直径的钢球重新试验。

5）表观硬度的测定，在两相互垂直方向测量压痕直径，布氏硬度 HBS 按下式

计算：

$$HBS = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中　$F$——试验力，单位为 N；

$D$——钢球直径，单位为 mm；

$d$——压痕平均直径，单位为 mm。

## 3.20　无色光学玻璃克氏硬度试验

无色光学玻璃克氏硬度试验按照 GB/T 7962.18—2010《无色光学玻璃测试方法　第 18 部分：克氏硬度》进行。

### 3.20.1　试样

1）样品玻璃内应无肉眼可见条纹、气泡、结石等夹杂物，应力双折射应不大于 10nm/cm。

2）样品尺寸为 20mm×20mm×10mm，两大面应平行且平行度误差不大于 0.01mm，一大面抛光，表面粗糙度 $Ra$ 为 0.05μm，其余各面细磨。

### 3.20.2　试验设备

1）显微硬度计。

2）施压负荷：0.98N，±1%。

3）压头下降速度：20mm/min。

4）对角线长度测量不确定度：±0.001nm。

5）显微镜放大倍数：600。

### 3.20.3　试验内容及结果表示

1）根据仪器使用说明书的要求调试和校正仪器，使仪器进入正常工作状态。

2）测量前，用酒精清洗样品表面，放入干燥器内待用。

3）样品放在显微镜视场下，调焦，使样品表面清晰，避开缺陷，将样品推至压头下。

4）按规定在压头上加 0.98N 负荷，将压头压在样品表面上，停留时间 20s。

5）提起压头，将样品推至显微镜视场下，在 6min 内测量出压痕长对角线的长度 $d$。

6）克氏硬度的测定，克氏硬度采用对称棱角为 172°30′和 130°的四角锥金刚石压头（见图 3-40）测试，全称为克努普显微压痕硬度。

施加一定负荷垂直压在样品表面上，保持一定时间后，撤去负荷，用显微镜观察并测量样品上压痕长对角线的长度，换算出压痕的投影面积（见图 3-41），用下式计算克氏硬度：

$$HK = 1.4229\frac{F}{d^2}$$

式中　$F$——施压负荷，单位为 N；

$d$——压痕长对角线的长度，单位为 mm；

HK——克氏硬度，单位为 $10^7$ Pa。

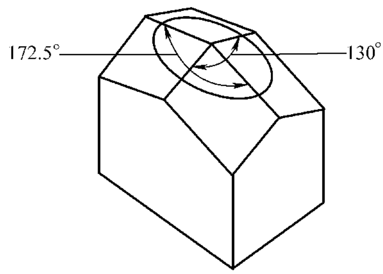



图 3-40　金刚石压头

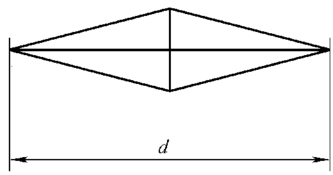



图 3-41　压痕投影

$d$—压痕长对角线的长度

# 第 4 章　材料冲击性能测定试验

## 4.1　材料冲击性能相关知识

**1. 冲击性能及冲击试验的定义**

材料抵抗冲击载荷的能力称为材料的冲击性能。冲击载荷是指以较高的速度施加到零件上的载荷。当零件在承受冲击载荷时，瞬间冲击所引起的应力和变形比静载荷时要大得多。因此，在制造这类零件时，就必须考虑到材料的冲击性能。

冲击试验是利用能量守恒原理，将具有一定形状和尺寸的带有 V 型或 U 型缺口的试样，在冲击载荷作用下冲断，以测定其吸收能量的一种试验方法。冲击试验是试样在冲击试验力的作用下的一种动态力学性能试验。冲击试验对材料的缺陷很敏感，它能灵敏地反映出材料的宏观缺陷、显微组织的微小变化和材料质量。因此，冲击试验是生产上用来检验冶炼、热加工、热处理工艺质量的有效方法。

**2. 冲击试验常用术语**

（1）夏比冲击试验　夏比冲击试验是用规定高度的摆锤对处于简支梁状态的缺口试样进行一次性冲击，并测量试样折断时的吸收能量的试验。夏比冲击试样有 U 型缺口试样和 V 型缺口两种试样。V 型缺口由于应力集中较大，应力分布对缺口附近体积塑性变形的限制较大而使塑性变形更难进行。V 型缺口参与塑性变形的体积较小，冲击时吸收能量较低，且脆性转变温度较高和范围较窄，对温脆性转变反应更灵敏，断口也较清晰，更容易反映金属阻止裂纹扩展的抗力。

（2）实际初始势能（$K_p$）　对试验机直接检验测定的值。

（3）吸收能量（$K$）　由指针或其他指示装置示出的能量值。用字母 V 和 U 表示缺口几何形状，用下角标数字 2 或 8 表示摆锤刀刃半径，例如 $KV_2$。

（4）试样高度（$h$）　试样开缺口面与其相对面之间的距离，如图 4-1 所示。

（5）试样宽度（$w$）　试样与缺口轴线平行且垂直于高度方向的尺寸，如图 4-1 所示。

（6）试样长度（$L$）　与缺口方向垂直的最大尺寸，缺口方向即缺口深度方向，如图 4-1 所示。

（7）仪器化冲击试验　仪器化冲击试验是在冲击试验机上装有力传感器和位移传感器可以显示和记录冲击过程各种参量的一种试验。冲击试验时的冲击吸收能量通常由裂纹形成能量和裂纹扩展能量两部分组成，将这两部分能量分别进行记录和分析可以更好地评定金属的脆断倾向。夏比 V 型缺口冲击试样在疲劳试验机上预制成全深为 5mm 的疲劳裂纹，然后在装置有自动记录的夏比冲击试验机上进行冲击试验，冲击摆锤上贴有电阻应变片可以传感冲击过程中载荷的变化，其输出由计算机观测和记录而得到冲击

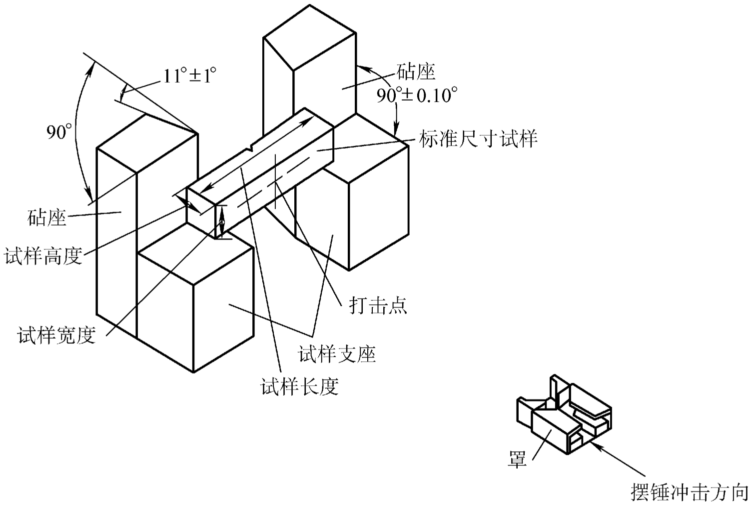



图 4-1　试样与摆锤冲击试验机支座及砧座相对位置

过程中的载荷-时间曲线，再通过各种测量位移的装置求出冲击过程中位移与时间的关系，由此求出位移-时间曲线，从而可求得动态开裂发生的动态断裂韧度 $K_{ID}$。

（8）屈服力（$F_{gy}$）　力-位移曲线从直线上升部分向曲线上升部分增加转变点时的力。它表征穿过试样全部不带裂纹试样的韧带发生屈服时的近似值，实质上是试样缺口根部发生屈服时相应的冲击力。

（9）最大力（$F_m$）　力-位移（或力-时间）曲线上力的最大值。

（10）不稳定裂纹扩展起始力（$F_{iu}$）　力-位移（或力-时间）曲线急剧下降开始时的力。它表示不稳定扩展开始时的特征。

（11）不稳定裂纹扩展终止力（$F_a$）　力-位移（或力-时间）曲线急剧下降终止时的力。

（12）屈服位移（$s_{gy}$）　与屈服力相对应的位移。

（13）最大力时的位移（$s_m$）　与最大力相对应的位移。

（14）不稳定裂纹扩展起始位移（$s_{iu}$）　不稳定裂纹扩展开始时的位移。

（15）不稳定裂纹扩展终止位移（$s_a$）　不稳定裂纹扩展终止时的位移。

（16）总位移（$s_t$）　力-位移曲线结束时的位移。

（17）最大力时的能量（$W_m$）　力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_m$ 部分的面积。

（18）不稳定裂纹扩展起始能量（$W_{iu}$）　力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_{iu}$ 部分的面积。

（19）不稳定裂纹扩展终止能量（$W_a$）　力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_a$ 部分的面积。

（20）裂纹形成能量（$W_i$）　近似认为，力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_m$ 部分的面积，即 $W_i \approx W_m$。

（21）裂纹扩展能量（$W_p$）　力-位移曲线下从 $s=s_m$ 到 $s=s_t$ 的面积，即 $W_p=W_t-W_i$。

（22）总冲击能量（$W_t$）　力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_t$ 的面积。

（23）冲击试样断口　冲击试样冲断后的断裂表面及临近表面的区域。其宏观外貌

一般呈晶状，纤维状（含剪切唇）或混合状。

（24）晶状断面　断裂表面一般呈现金属光泽的晶状颗粒，无明显塑性变形的齐平断面。

（25）晶状断面率　断口中晶状区的总面积与缺口下方原始横截面积的百分比。

（26）纤维状断面　断裂表面一般呈现无金属光泽的纤维形貌，有明显塑性变形的断面。

（27）纤维断面率　断口中纤维区的总面积与缺口下方原始横截面积的百分比。

（28）侧膨胀值　断裂试样缺口侧面每侧宽度较大增加量之和，单位为 mm。

## 4.2　金属材料夏比摆锤冲击试验

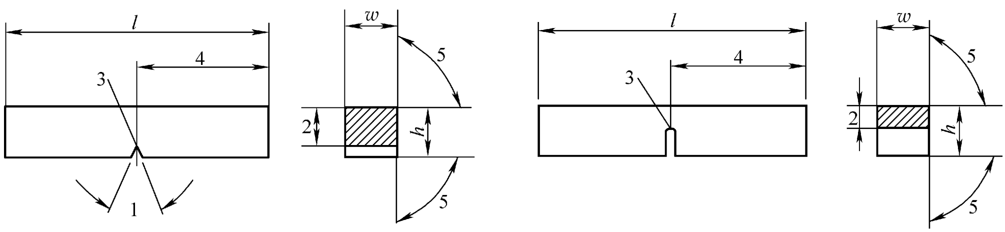
金属材料夏比摆锤冲击试验按照 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行。

### 4.2.1　试样

**1. 一般要求**

标准尺寸冲击试样长度为 55mm，横截面为 10mm × 10mm 方形截面。在试样长度中间有 V 型或 U 型缺口。

如果试料不够制备标准尺寸试样，可使用宽度 7.5mm、5mm 或 2.5mm 的小尺寸试样，如图 4-2 和表 4-1 所示。




a)　　b)

图 4-2　夏比冲击试样

a）V 型缺口　b）U 型缺口

注：$l$、$h$、$w$ 和数字 1 ~ 5 的含义见表 4-1。

**表 4-1　试样的尺寸与偏差**

| 名　称 | | 符号及序号 | V 型缺口试样 | | U 型缺口试样 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 公称尺寸 | 机加工偏差 | 公称尺寸 | 机加工偏差 |
| 长度/mm | | $l$ | 55 | ±0.60 | 55 | ±0.60 |
| 高度/mm | | $h$ | 10 | ±0.075 | 10 | ±0.11 |
| 宽度/mm | 标准试样 | $w$ | 10 | ±0.11 | 10 | ±0.11 |
| | 小试样 | | 7.5 | ±0.11 | 7.5 | ±0.11 |
| | | | 5 | ±0.06 | 5 | ±0.06 |
| | | | 2.5 | ±0.04 | — | — |

（续）

| 名　　称 | 符号及序号 | V 型缺口试样 | | U 型缺口试样 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 公称尺寸 | 机加工偏差 | 公称尺寸 | 机加工偏差 |
| 缺口角度/(°) | 1 | 45 | ±2 | — | — |
| 缺口底部高度/mm | 2 | 8 | ±0.075 | 8① | ±0.09 |
| | | | | 5 | ±0.09 |
| 缺口根部半径/mm | 3 | 0.25 | ±0.025 | 1 | ±0.07 |
| 缺口对称面-端部距离/mm | 4 | 27.5 | ±0.42② | 27.5 | ±0.42② |
| 缺口对称面-试样纵轴角度/(°) | — | 90 | ±2 | 90 | ±2 |
| 试样纵向面间夹角/(°) | 5 | 90 | ±2 | 90 | ±2 |

注：除端部外，试样表面粗糙度 *Ra* 应小于 5μm。

① 如规定其他高度，应规定相应偏差。

② 对自动定位试样的试验机，建议偏差用 ±0.165mm 代替 ±0.42mm。

对于低能量的冲击试验，因为摆锤要吸收额外能量，因此垫片的使用非常重要。对于高能量的冲击试验，垫片的使用并不十分重要。应在支座上放置适当厚度的垫片，以使试样打击中心的高度为 5mm（相当于宽度 10mm 标准试样打击中心的高度）。

试样表面粗糙度 *Ra* 应优于 5μm，端部除外。

对于需热处理的试验材料，应在最后精加工前进行热处理，除非已知两者顺序改变不导致性能的差别。

**2. 缺口几何形状**

对缺口的制备应仔细，以保证缺口根部处没有影响吸收能量的加工痕迹。缺口对称面应垂直于试样纵向轴线。

（1）V 型缺口　V 型缺口应有 45°夹角，其深度为 2mm，底部曲率半径为 0.25mm，如图 4-1 和表 4-1 所示。

（2）U 型缺口　U 型缺口深度应为 2mm 或 5 mm（除非另有规定），底部曲率半径为 1mm，如图 4-1 和表 4-1 所示。

**3. 试样的制备和标记**

试样样坯的切取应按相关产品标准或 GB/T 2975 的规定执行，试样制备过程应使由于过热或冷加工硬化而改变材料冲击性能的影响减至最小。

试样标记应远离缺口，不应标在与支座、砧座或摆锤刀刃接触的面上。试样标记应避免塑性变形和表面不连续性对冲击吸收能量的影响。

## 4.2.2　试验设备

**1. 一般要求**

所有测量仪器均应溯源至国家标准或国际标准。这些仪器应在合适的周期内进行校准。

**2. 试验机的安装及检验**

摆锤冲击试验机分为简支梁冲击试验机、悬臂梁冲击试验机、拉伸冲击试验机等类型，主要用于金属材料和工程塑料、玻璃钢、陶瓷、增强尼龙、电绝缘材料等非金属材

料的冲击性能的测定。摆锤冲击试验机有指针式和电子式两种类型，具有精度高、稳定性好、操作方便、安全等特点，其中电子式冲击试验机采用液晶显示，微型打印机输出试验结果，并具有能量损失自动修正功能。

试验机应按 GB/T 3808 或 JJG 145 进行安装及检验。摆锤冲击试验机主要由五部分组成，包括基础、机架、摆锤、砧座和支座、指示装置，如图 4-3 所示。

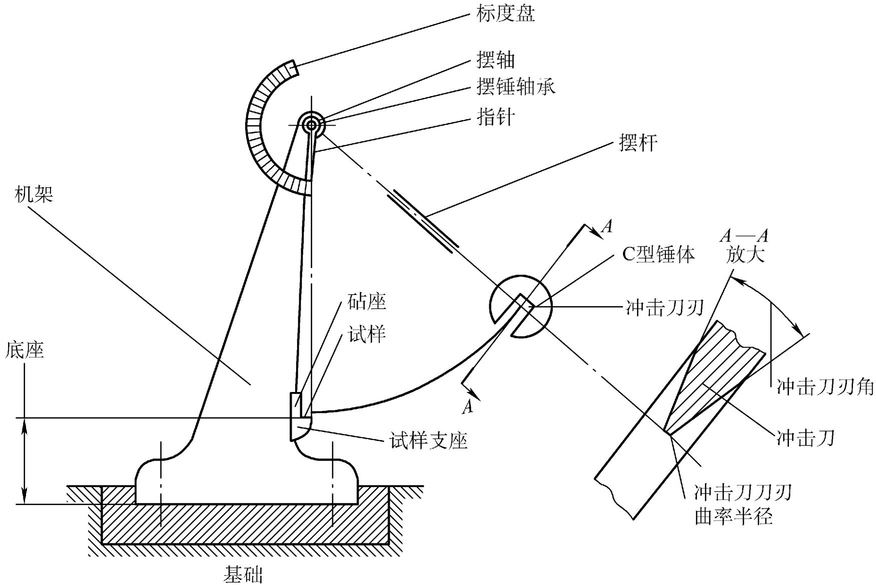



图 4-3　摆锤冲击试验机的组成部分

**3. 摆锤刀刃**

摆锤刀刃半径应为 2mm 和 8mm 两种，用下角标数字表示：$KV_2$、$KU_2$、$KV_8$ 或 $KU_8$。摆锤刀刃半径的选择应参考相关产品标准。对于低能量的冲击试验，一些材料用 2mm 和 8mm 摆锤刀刃试验测定的结果有明显不同，2mm 摆锤刀刃的结果可能高于 8mm 摆锤刀刃的结果。

**4. 低温冲击试验机**

低温冲击试验机的结构，包括冲击试验机、低温炉及电器控制操纵部分。

（1）冲击试验机　与室温冲击试验机相比，它除了底座、机身、摆锤及表盘，外加了保护罩。低温冲击试验时，试样靠机械自动送到支座上。

（2）低温炉　低温炉能够冷却试样到所要求的试验温度，并能保持这一温度。炉体通常用不锈钢制造，内外层之间用绝热材料分开，炉膛内有装冲击试样的匣子。当试样温度降到试验温度时，应保持足够时间，使试样表面温度与心部温度一致。温度的控制与保持均在操作台上进行。

（3）保温　试样应在规定温度下保持一段时间。使用液体介质时，保温时间不少于 5min；使用气体介质时，保温时间不少于 20min。

（4）冷源　低温冲击试验试样冷却装置使用的冷源，最常用的是干冰（固体二氧化碳）和液氮，它们无毒性、安全，对金属不起侵蚀作用。用酒精作为介质，干冰为

冷源，可以获得 $-70$℃以上的温度；用液氮作冷源可获得 $-90\sim0$℃的低温。当试验温度为 $-90\sim-70$℃时，一般使用液氮作为冷源。

（5）低温环境的产生和控制　对液氮瓶内的电阻丝加热，使液氮蒸发产生一定压力，从而使液氮沿管路压进低温炉内，降低试样温度。当达到试验温度后，控制部分使加热电阻丝停止加热，液氮输送终止，以达到保温目的。在没有低温冲击机设备时，使用常温冲击机也可进行低温冲击试验，可采用低温容器，对试样降温，如图 4-4 所示。冷却介质一般为酒精或甲醇，用干冰或液氮作冷源。由于低于室温的试样置于室温下温度会逐步回升，因而试样实际温度会高于在低温容器中的试样温度。为了减少送样时温度升高的影响，可采取对试样冷却时有一定过冷度的方法，以补偿送样过程中温度升高的影响。

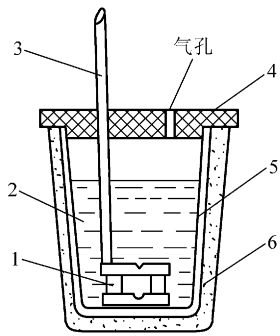



图 4-4　放试样的低温容器

1—冲击试样　2—冷却介质　3—温度计　4—软木塞　5—玻璃杯　6—泡沫塑料

（6）时间　试样从液体介质中移出至打击的时间应在 2s 之内，试样离开气体介质装置打击的时间应在 1s 之内。如不能满足上述要求，则必须在 3～5s 内打断试样，此时应采用过冷试样的方法补偿温度损失。过冷度如表 4-2 所示。

**表 4-2　低温冲击试验的过冷度**

| 试验温度/℃ | 过冷温度补偿值/℃ |
|---|---|
| $-192\sim<-100$ | $3\sim<4$ |
| $-100\sim<-60$ | $2\sim<3$ |
| $-60\sim<0$ | $1\sim<2$ |

（7）其他要求　为使试样冷却温度均匀一致，低温槽应具有足够容量，并能对槽内的冷却介质进行均匀搅拌。测温用热电偶偏差应不大于 ±0.5℃。测温辅助仪器（如自动指示装置或电位差计）误差应不超过 ±0.1%。试样保温期间温度波动，温度控制装置应能将试验温度稳定在规定值的 ±2℃之内。

**5. 高温冲击试验机**

高温冲击试验机包括了高温和低温冲击试验，其工作温度为 $-196\sim900$℃。试验过程中的取样、高温送样、冲击、制动均为自动化控制。

高温炉加热器可分为二段或三段炉丝绕制，分别控制加热炉工作段的温度和梯度。控制温度组件可采用铂电阻，或者直接由热电偶的指示温度进行监测。如果没有专用的高温冲击机，也可用小型箱式炉加热试样，在一般的冲击机上进行高温冲击。但应该注意从炉内取出试样的转移时间间隔，一般试样从液体介质中移出至打击时间在 2s 之内，试样离开气体介质装置至打击的时间应在 1s 之内。若在 3～5s 内打断试样，此时应根据试验时环境温度及试验温度的高低确定一定的过热温度，以补偿取样转移过程中试样温度的降低。试样在不同试验温度下的过热度如表 4-3 所示。试样加热到规定温度并保温 20min 后即可进行试验。

表 4-3　高温冲击试验过热温度值

| 试验温度/℃ | 过热温度补偿值/℃ | 试验温度/℃ | 过热温度补偿值/℃ |
|---|---|---|---|
| 35 ~ <200 | 1 ~ <5 | 600 ~ <700 | 20 ~ <25 |
| 200 ~ <400 | 5 ~ <10 | 700 ~ <800 | 25 ~ <30 |
| 400 ~ <500 | 10 ~ <15 | 800 ~ <900 | 30 ~ <40 |
| 500 ~ <600 | 15 ~ <20 | 900 ~ <1000 | 40 ~ <50 |

## 4.2.3　试验内容及结果表示

**1. 一般要求**

试样应紧贴试验机砧座，锤刃沿缺口对称面打击试样缺口的背面，试样缺口对称面偏离两砧座间的中点应不大于 0.5mm，如图 4-1 所示。

试验前应检查摆锤空打时的回零差或空载能耗。

试验前应检查砧座跨距，砧座跨距应保证在 $40^{+0.2}_{0}$mm 以内。

**2. 试验温度**

1）对于试验温度有规定的，应在规定温度 ±2℃ 范围内进行。如果没有规定，室温冲击试验应在 23℃ ±5℃ 范围进行。

2）当使用液体介质冷却试样时，试样应放置于一容器中的网栅上，网栅至少高于容器底部 25mm，液体浸过试样的高度不小于 25mm，试样距容器侧壁不小于 10mm。应连续均匀搅拌介质以使温度均匀。测定介质温度的仪器推荐置于一组试样中间处。介质温度应在规定温度 ±1℃ 以内，保持至少 5min。当使用气体介质冷却试样时，试样距低温装置内表面以及试样与试样之间应保持足够的距离，试样应在规定温度下保持至少 20min。当液体介质接近其沸点时，从液体介质中移出试样至打击的时间间隔中，介质蒸发冷却会明显降低试样温度。

3）对于试验温度不超过 200℃ 的高温试验，试样应在规定温度 ±2℃ 的液池中保持至少 10min。

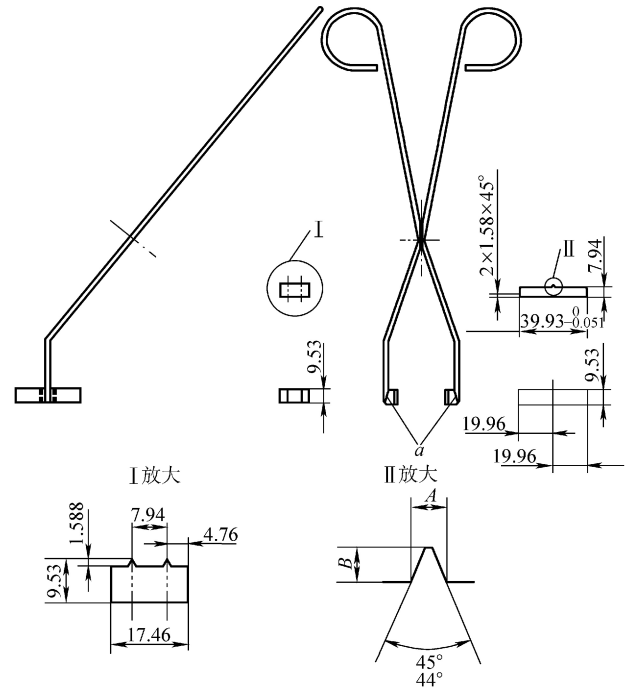
4）对于试验温度超过 200℃ 的试验，试样应在规定温度 ±5℃ 以内的高温装置内保持至少 20min。

**3. 试样的转移**

当试验不在室温进行时，试样从高温或低温装置中移出至打断的时间应不大于 5s。转移装置的设计和使用应能使试样温度保持在允许的温度范围内。转移装置与试样接触部分应与试样一起加热或冷却。应采取措施，确保试样对中装置不引起低能量高强度试样断裂后回弹到摆锤上而引起不正确的能量偏高指示。试样端部和对中装置的间隙或定位部件的间隙应大于 13mm，否则，在断裂过程中，试样端部可能回弹至摆锤上。

对于试样从高温或低温装置中移出至打击时间在 3 ~5s 的试验，可考虑采用过冷或过热试样的方法补偿温度损失，过冷度或过热度参见表 4-2 和表 4-3。对于高温试样应充分考虑过热对材料性能的影响。

V 型缺口自动对中夹钳（见图 4-5）一般用于将试样从控温介质中移至适当的试验位置。此类夹钳消除了由于断样和固定的对中装置之间相互影响带来的潜在间隙问题。




| 试样宽度/mm | 缺口宽度*A*/mm | 高度*B*/mm |
|---|---|---|
| 10 | 1.60～1.70 | 1.52～1.65 |
| 5 | 0.74～0.80 | 0.69～0.81 |
| 3 | 0.45～0.51 | 0.36～0.48 |

图 4-5　V 型缺口夏比冲击试样对中夹钳

**4. 试验机能力范围**

试样吸收能量 $K$ 不应超过实际初始势能 $K_p$ 的 80%。如果试样吸收能超过此值，在试验报告中应报告为近似值，并注明超过试验机能力的 80%。建议试样吸收能量 $K$ 的下限应不低于试验机最小分辨力的 25 倍。

理想的冲击试验应在恒定的冲击速度下进行。在摆锤式冲击试验中，冲击速度随断裂进程降低，对于冲击吸收能量接近摆锤打击能力的试样，打击期间摆锤速度已下降至不再能准确获得冲击能量。

**5. 试样未完全断裂**

对于试样试验后没有完全断裂，可以报出冲击吸收能量，或与完全断裂试样结果平均后报出。

由于试验机打击能量不足，试样未完全断开，吸收能量不能确定，试验报告应注明用“×J”的试验机试验，试样未断开。

**6. 试样卡锤**

如果试样卡在试验机上，试验结果无效，应彻底检查试验机；否则，试验机的损伤会影响测量的准确性。

**7. 断口检查**

如果断裂后检查显示出试样标记是在明显的变形部位，试验结果可能不代表材料的性能，应在试验报告中注明。

**8. 试验结果**

读取每个试样的冲击吸收能量，应至少估读到 0.5J 或 0.5 个标度单位（取两者之间较小值）。试验结果至少应保留 2 位有效数字，修约方法按 GB/T 8170 执行。

**9. 断口形貌**

夏比冲击试样的断口表面常用剪切断面率评定。剪切断面率越高，材料韧性越好。大多数夏比冲击试样的断口形貌为剪切和解理断裂的混合状态。

剪切断口常称为纤维断口，解理断口或晶状断口往往针对剪切断口反向评定。0% 剪切断口就是 100% 解理断口。

通常使用以下方法测定剪切断面率：

1）测量断口解理断裂部分（即“闪亮”部分）的长度和宽度，如图 4-6 所示，按表 4-4 计算剪切断面率。

2）将断口放大，并与预先制好的对比图进行比

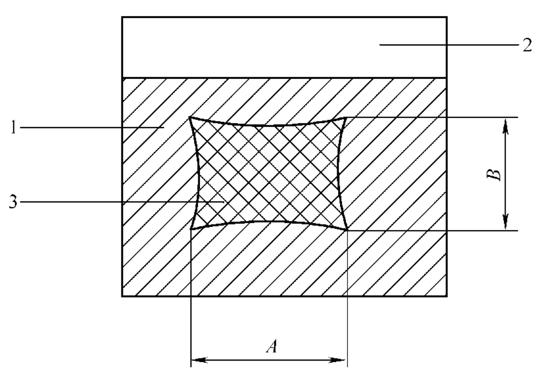



图 4-6　剪切断面率百分比的尺寸

1—剪切面积　2—缺口　3—解理面积

注：测量 $A$ 和 $B$ 的平均尺寸应精确至 0.5mm。

较，或用求积仪测量剪切断面率（用 100% 减去解理断面率）。

3）断口拍成放大照片，用求积仪测量剪切断面率（100% －解理断面率）。

4）用图像分析技术测量剪切断面率。

**表 4-4　剪切断面率百分比**

| B/mm | A/mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10 |
| 1.0 | 99 | 98 | 98 | 97 | 96 | 96 | 95 | 94 | 94 | 93 | 92 | 92 | 91 | 91 | 90 | 89 | 89 | 88 | 88 |
| 1.5 | 98 | 97 | 96 | 95 | 94 | 93 | 92 | 92 | 91 | 90 | 89 | 88 | 87 | 86 | 85 | 84 | 83 | 82 | 81 |
| 2.0 | 98 | 96 | 95 | 94 | 92 | 91 | 90 | 89 | 88 | 86 | 85 | 84 | 82 | 81 | 80 | 79 | 77 | 76 | 75 |
| 2.5 | 97 | 95 | 94 | 92 | 91 | 89 | 88 | 86 | 84 | 83 | 81 | 80 | 78 | 77 | 75 | 73 | 72 | 70 | 69 |
| 3.0 | 96 | 94 | 92 | 91 | 89 | 87 | 85 | 83 | 81 | 79 | 77 | 76 | 74 | 72 | 70 | 68 | 66 | 64 | 62 |
| 3.5 | 96 | 93 | 91 | 89 | 87 | 85 | 82 | 80 | 78 | 76 | 74 | 72 | 69 | 67 | 65 | 63 | 61 | 58 | 56 |
| 4.0 | 95 | 92 | 90 | 88 | 85 | 82 | 80 | 77 | 75 | 72 | 70 | 67 | 65 | 62 | 60 | 57 | 55 | 52 | 50 |
| 4.5 | 94 | 92 | 89 | 86 | 83 | 80 | 77 | 75 | 72 | 69 | 66 | 63 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 46 | 44 |
| 5.0 | 94 | 91 | 88 | 85 | 81 | 78 | 75 | 72 | 69 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 41 | 37 |
| 5.5 | 93 | 90 | 86 | 83 | 79 | 76 | 72 | 69 | 66 | 62 | 59 | 55 | 52 | 48 | 45 | 42 | 38 | 35 | 31 |
| 6.0 | 92 | 89 | 85 | 81 | 77 | 74 | 70 | 65 | 62 | 59 | 55 | 51 | 47 | 44 | 40 | 36 | 33 | 29 | 25 |
| 6.5 | 92 | 88 | 84 | 80 | 76 | 72 | 67 | 63 | 59 | 55 | 51 | 47 | 43 | 39 | 35 | 31 | 27 | 23 | 19 |
| 7.0 | 91 | 87 | 82 | 78 | 74 | 69 | 65 | 61 | 56 | 52 | 47 | 43 | 39 | 34 | 30 | 26 | 21 | 17 | 12 |
| 7.5 | 91 | 86 | 81 | 77 | 72 | 67 | 62 | 58 | 53 | 48 | 44 | 39 | 34 | 30 | 25 | 20 | 16 | 11 | 6 |
| 8.0 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 |

注：当 A 或 B 是零时，为 100% 剪切外观。

### 10. 冲击吸收能量-温度曲线和转变温度

冲击吸收能量-温度曲线（K-T 曲线）表明，对于给定形状的试样，冲击吸收能量是试验温度的函数，如图 4-7 所示。通常曲线是通过拟合单独的试验点得到的。曲线的形状和试验结果的分散程度依赖于材料、试样形状和冲击速度。出现转变区的曲线，具有上平台、转变区和下平台。

转变温度 $T_t$ 表征冲击吸收能量-温度曲线陡峭上升的位置。因为陡峭上升区通常覆盖较宽的温度范围，因此不能明确定义为一个温度。可用如下几种判据规定转变温度：

1）冲击吸收能量达到某一特定值时，例如 $KV_8 = 27J$。

2）冲击吸收能量达到上平台值（见图 4-7）的某一百分数，例如 50%。

3）剪切断面率达到某一百分数，例如 50%。

用以确定转变温度的方法应在相关产品标准规定，或通过协议规定。

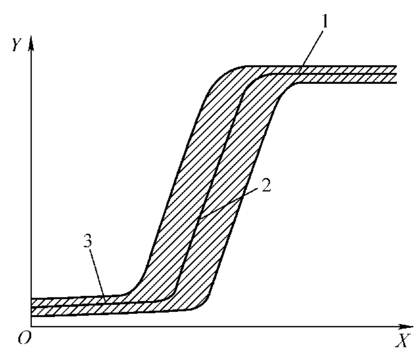



图 4-7　冲击吸收能量-温度曲线示意图

X—温度　Y—冲击吸收能量

1—上平台区　2—转变区　3—下平台区

# 4.3 金属材料夏比冲击断口测定试验

金属材料夏比冲击断口测定试验按照 GB/T 12778—2008《金属夏比冲击断口测定方法》进行。

## 4.3.1 试样

1）夏比缺口冲击试样的形状、尺寸及试验方法应符合 GB/T 229 的规定，冲断后的试样即为夏比冲击断口测定试验的测试试样。

2）试样断口表面及侧面不应污染、锈蚀和碰伤，垂直于缺口的两个侧面不应有毛刺。

3）测定侧膨胀值的试样，在垂直于缺口的侧面上，做同侧标记。

## 4.3.2 试验设备

**1. 试验机**

冲击试验机应符合 GB/T 3808 的规定，当要记录冲击曲线时，应使用符合 GB/T 19748 要求的仪器化冲击试验机。

**2. 侧膨胀仪**

侧膨胀仪的分辨力应不大于 0.01mm。

**3. 投影仪、游标卡尺等量具**

投影仪、游标卡尺等量具的分辨力应不大于 0.02mm。

## 4.3.3 试验内容及结果表示

**1. 纤维断面率的测定**

纤维断面是指断裂表面一般呈现无金属光泽的纤维形貌，有明显塑性变形的断面。断面中纤维区的总面积与缺口处原始横截面积的百分比称为纤维断面率。

（1）对比法　将冲击试样断口与冲击试样断口纤维断面率示意图（见图 4-8）进行比较，估算出纤维断面率。

（2）游标卡尺测定法　按断口上晶状区的形状，若能归类成矩形、梯形时（见图

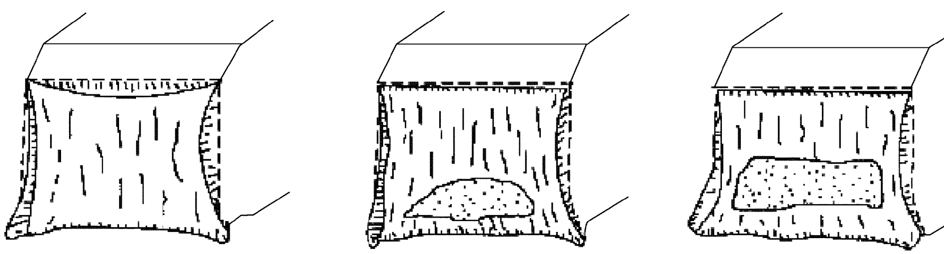



图 4-8　冲击试样断口纤维断面率示意图

4-9)，可用游标卡尺测出相应尺寸，直接查表 4-5 得到纤维断面率。

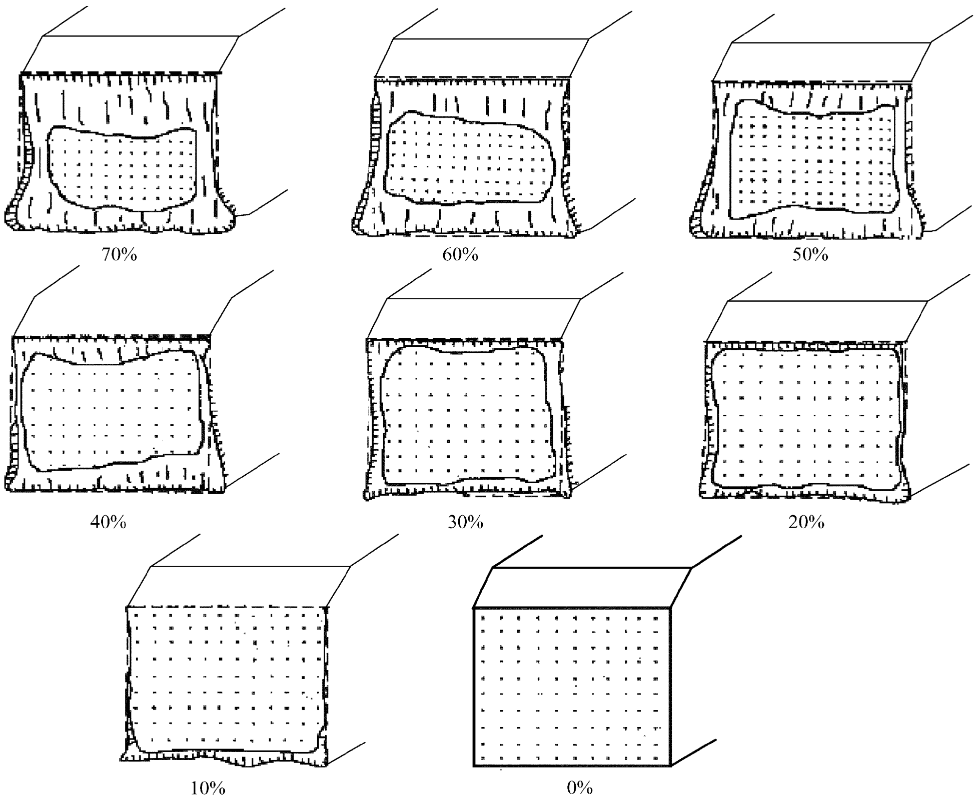



图 4-8　冲击试样断口纤维断面率示意图（续）

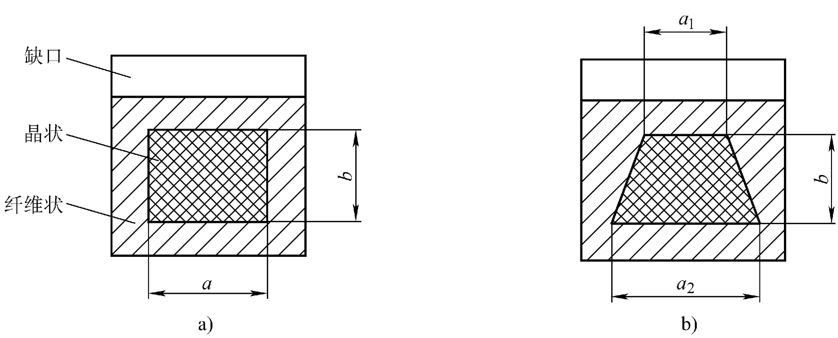



图 4-9　游标卡尺测定法示意图

a）矩形中测 $a$、$b$ 的值　b）梯形中测 $a_1$、$a_2$、$b$ 的值，$a=(a_1+a_2)/2$

表 4-5　纤维断面率

| b/mm | a/mm | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10 |
| | 纤维断面率(%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.0 | 99 | 98 | 98 | 97 | 96 | 96 | 95 | 94 | 94 | 93 | 92 | 92 | 91 | 91 | 90 | 89 | 89 | 88 | 88 |
| 1.5 | 98 | 97 | 96 | 95 | 94 | 93 | 92 | 92 | 91 | 90 | 89 | 88 | 87 | 86 | 85 | 81 | 83 | 82 | 81 |
| 2.0 | 98 | 96 | 95 | 94 | 92 | 91 | 90 | 89 | 88 | 86 | 85 | 84 | 82 | 81 | 80 | 79 | 78 | 76 | 75 |
| 2.5 | 97 | 95 | 94 | 92 | 91 | 89 | 88 | 86 | 84 | 83 | 81 | 80 | 78 | 77 | 75 | 73 | 72 | 70 | 69 |
| 3.0 | 96 | 94 | 92 | 91 | 89 | 87 | 85 | 83 | 81 | 79 | 78 | 76 | 74 | 72 | 70 | 68 | 66 | 64 | 62 |
| 3.5 | 96 | 93 | 91 | 89 | 87 | 85 | 82 | 80 | 78 | 76 | 74 | 72 | 69 | 67 | 65 | 63 | 61 | 58 | 56 |
| 4.0 | 95 | 92 | 90 | 88 | 85 | 82 | 80 | 78 | 75 | 72 | 70 | 68 | 65 | 62 | 60 | 58 | 55 | 52 | 50 |
| 4.5 | 94 | 92 | 89 | 86 | 83 | 80 | 78 | 75 | 72 | 69 | 66 | 63 | 61 | 58 | 55 | 52 | 49 | 47 | 44 |
| 5.0 | 94 | 91 | 88 | 85 | 81 | 78 | 75 | 72 | 69 | 66 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 44 | 41 | 38 |
| 5.5 | 93 | 90 | 86 | 83 | 79 | 76 | 72 | 69 | 66 | 62 | 59 | 55 | 52 | 48 | 45 | 42 | 38 | 35 | 31 |
| 6.0 | 92 | 89 | 85 | 81 | 78 | 74 | 70 | 66 | 62 | 59 | 55 | 51 | 48 | 44 | 40 | 36 | 32 | 29 | 25 |
| 6.5 | 92 | 88 | 84 | 80 | 76 | 72 | 68 | 63 | 59 | 55 | 51 | 47 | 43 | 39 | 35 | 31 | 27 | 23 | 19 |
| 7.0 | 91 | 87 | 82 | 78 | 74 | 69 | 65 | 61 | 56 | 52 | 48 | 43 | 39 | 34 | 30 | 26 | 21 | 17 | 12 |
| 7.5 | 91 | 86 | 81 | 77 | 72 | 67 | 62 | 58 | 53 | 48 | 44 | 39 | 34 | 30 | 25 | 20 | 16 | 11 | 6 |
| 8.0 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 |

（3）计算法　若断口上晶状部分形状不规则时，可归类成若干个正方形、平行四边形、三角形或梯形等，再测量相应尺寸，计算其总面积，然后用下式算出晶状断面率：

$$CA=\frac{S_c}{S_o}\times100\%$$

式中　$CA$——晶状断面率（%）；

$S_c$——断口中晶状区的总面积，单位为 $mm^2$；

$S_o$——原始横截面积，单位为 $mm^2$。

按下式计算纤维断面率：

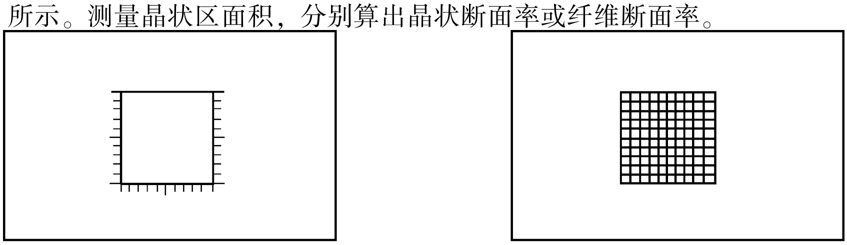
$$FA=\frac{S_o-S_c}{S_o}\times100\%$$

式中　$FA$——纤维断面率（%）；

$S_c$——断口中晶状区的总面积，单位为 $mm^2$；

$S_o$——原始横截面积，单位为 $mm^2$。

（4）卡片测定法　用透明塑料薄膜制成 10mm×10mm 的方孔卡片或网格卡片，如图 4-10 所示。测量晶状区面积，分别算出晶状断面率或纤维断面率。



a)　　b)

图 4-10　测量晶状面积用卡片

a）方孔卡片　b）网格卡片

**2. 侧膨胀值的测定**

侧膨胀值是指断裂试样缺口侧面每侧宽度较大增加量之和，单位为 mm。

（1）侧膨胀仪测定法　按下面步骤进行：

1）校正侧膨胀仪零位。

2）先取一截试样，把被测面紧贴在基准座上，侧膨胀部位的最高点顶在百分表砧面上，记下读数。取另一截试样，在同一侧重复上述步骤，所测量两个值中的较大者即为试样该侧的膨胀量。

3）重复 2）中的操作，测出该试样另一侧的膨胀值。

4）两侧的膨胀量之和，即为该试样的侧膨胀值 $C_p$。

（2）游标卡尺测定法　按下面步骤进行：

1）测量试样原始宽度 $W_0$。

2）把冲断的两截试样的缺口背面相重合，并使侧面位于同一平面上，如图 4-11 所示。

3）压紧两截试样，使游标卡尺的测量面平行于试样的侧面，测量断口侧向膨胀最高点间的距离 $W_1$。

4）若断裂的两截试样连在一起，可直接用游标卡尺测量 $W_1$。

5）所测两数值之差 $C_p = W_1 - W_0$ 即为该试样的侧膨胀值。

（3）投影仪测定法　按下面步骤进行：

1）取一截试样，使其缺口朝下，放在光学投影仪的移动平台上。以试样原始宽度的一个棱边对准投影仪屏幕上的基准线，记录横向测微头上的读数 $b_0$；再旋转横向测微头，使基准线对准试样侧向膨胀部位的最高点，调整焦距，记录读数 $b_1$。计算两个数值之差（$b_0 - b_1$）的绝对值。取另一截试样，对同侧重复上述步骤。两个差值绝对值中的较大者即为试样该侧的膨胀量。

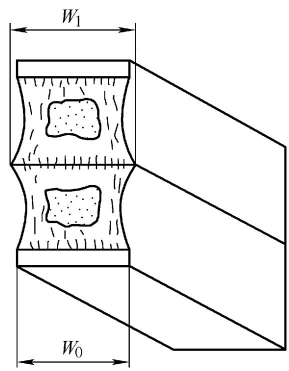


图 4-11　侧膨胀值的测定

2）重复上述步骤，测出该试样另一侧的膨胀量。

3）两侧的膨胀量之和，即为该试样的侧膨胀值 $C_p$。

## 4.4　钢材夏比 V 型缺口摆锤仪器化冲击试验

钢材夏比 V 型缺口摆锤仪器化冲击试验按照 GB/T 19748—2005《钢材夏比 V 型缺口摆锤冲击试验　仪器化试验方法》进行。

### 4.4.1　试样

夏比缺口冲击试样的形状、尺寸及试验方法应符合 GB/T 229 的规定。

### 4.4.2　试验设备

**1. 试验机**

冲击试验机应符合 GB/T 3808 的规定，并能自动测定力-时间或力-位移曲线，测定

的总冲击能量可与试验机指针指出的总吸收能量进行比较。

仪器化方法测量的结果和刻度盘指示的结果是相近的，但数值有所不同。如果两者之间的偏差超过 ±5J，应该作如下检查：

1）试验机的摩擦力。

2）测量系统的校准。

3）应用软件。

**2. 力的测量系统**

1）所用仪器应能测定力-时间或力-位移曲线及计算冲断试样过程中力的特征值、位移特征值及能量特征值。

2）由两个相同的应变片粘贴到冲击刀刃相对边上，并且与两个补偿应变片组成全桥电路。补偿应变片不应贴到试验机的任何受冲击或者振荡作用的部位。也可使用能满足测量要求的其他力传感器。

3）由力传感器、放大器及记录仪等组成的力测量系统，至少应有 100kHz 频率响应，对钢试样其信号上升时间 $t_r$ 应不大于 3.5μs。

对冲击力测量系统动态响应的评定，可以通过测量力-时间或力-位移曲线上第一个峰值对应的载荷值简化进行。经验表明，对于钢材 V 型缺口试样，当试样接触点到冲击刀刃上应变片中心距离为 11～15mm，且冲击速度为 5～5.5m/s 时，如果第一个载荷峰值大于 8kN，则认为测量系统的动态响应符合仪器化冲击试验要求。经验证明：具有 V 型缺口的试样对各种钢材名义冲击力在 10～40kN 之间。

4）力校准时，将力传感器装在锤头上形成部件进行。全部测量系统的静态线性为：力范围在 10%～50% 之间时为满量程的 ±1%；力范围在 50%～100% 之间时为满量程的 ±2%（见图 4-12）。当力传感器单独校准时，在标称范围的 10%～100% 之间为 ±1%。

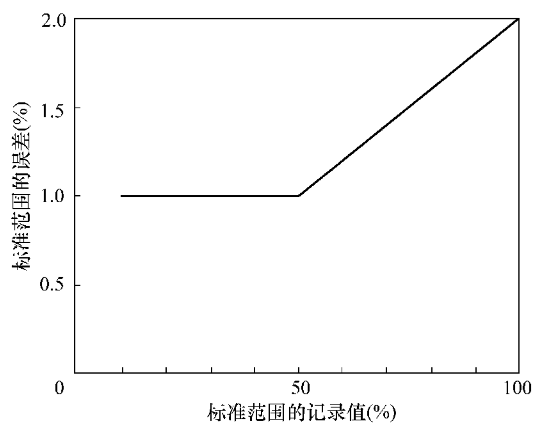



图 4-12　标准力范围内的记录值的允许误差

**3. 位移测量系统**

1）试样位移（试样与平台的相对位移）由力-时间曲线计算确定，也可由位移传感器直接测定。位移传感器可采用光学式、感应式或电容式位移传感器。

2）位移传感器系统信息的特性应与力测量系统一致，以使两者记录系统同步。位移测量传感器测量上限为 30mm，在 1～30mm 范围内测量误差为所测值的 ±2%。可在不放试样条件下，释放摆锤进行位移系统的动态校准，冲击速度按下式确定：

$$v_0 = \sqrt{2gh}$$

式中　$v_0$——冲击开始时的冲击速度，单位为 m/s；

$g$——重力加速度，单位为 $m/s^2$；

$h$——摆锤打击中心下落高度，单位为 m。

### 4.4.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

通过摆锤一次打断不同工件或不同温度下测出的力-位移曲线，即使力-位移曲线下的面积或吸收能量相同，如果力-位移曲线的形状和特征值有所不同，那么试样变形及断裂性质也不同。以此可以推断出试样变形和断裂的特性。

**2. 力-位移曲线的评定**

1）必须考虑叠加在力-位移（$F$-$s$）信号上的振荡，如图 4-13 所示，通过振荡曲线的拟合再现屈服力等特征值。

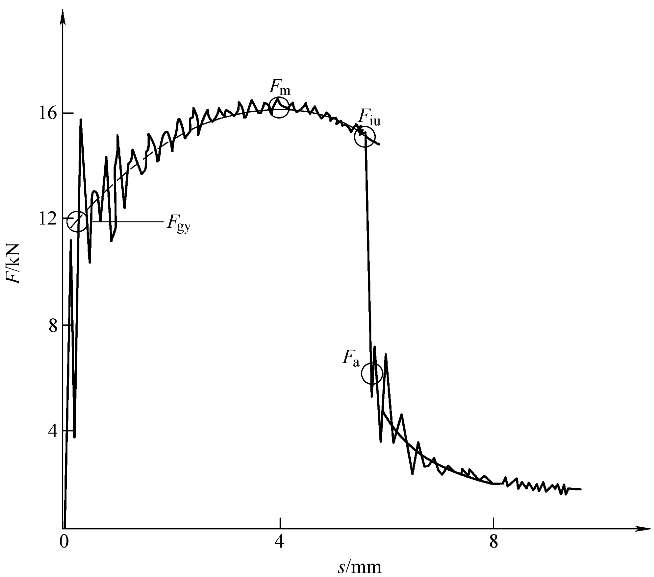
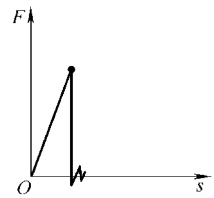
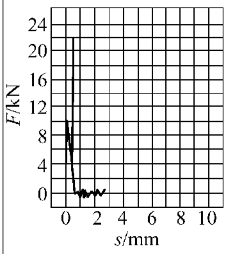
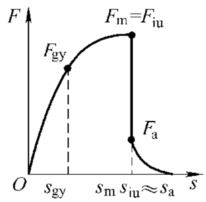
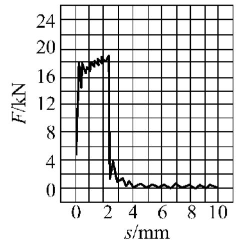
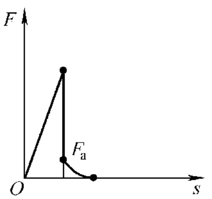
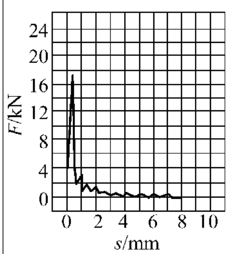
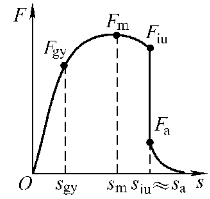
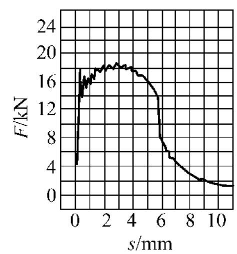
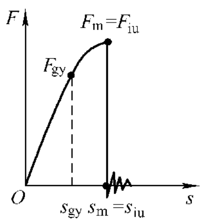
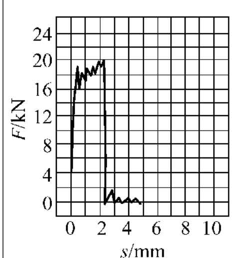
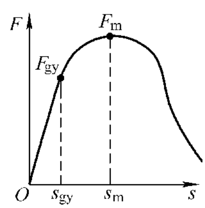
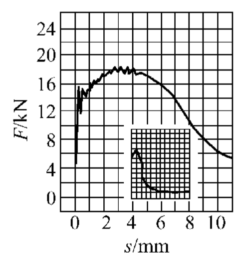



图 4-13　力特征值的确定

2）按冲击曲线近似关系将力-位移曲线分为 A、B、C、D、E、F 六种类型，如表 4-6 所示。在最大力前不存在屈服（即几乎不存在塑性变形）且只产生不稳定裂纹扩展的为 A 型；在最大力前不存在屈服力，但有少量稳定裂纹扩展的为 B 型；在最大力前存在塑性变形，并有稳定和不稳定裂纹扩展，根据其稳定或不稳定裂纹扩展所占比例的大小分为 C、D、E 型；只产生稳定裂纹扩展的为 F 型。这六种曲线类型中，A 与 B 型为脆性断裂，两者之差别在于 B 型曲线形状有少量的稳定扩展；F 型为韧性断裂，它只产生稳定扩展；C、D 和 E 型为半韧性断裂，它即存在稳定扩展又有不稳定扩展，但各种曲线形状中稳定的和不稳定的扩展所占比例不同。

表 4-6　力-位移特征曲线的分类

| 类型 | 示意图 | 实际曲线 | 类型 | 示意图 | 实际曲线 |
|---|---|---|---|---|---|
| A |  |  | D |  |  |
| B |  |  | E |  |  |
| C |  |  | F |  |  |

**3. 力特征值的确定**

1）力-位移（或力-时间）曲线上第二个峰急剧上升部分与拟合曲线的交点对应的力即为屈服力。

2）穿过振荡曲线的拟合曲线上最大值所对应的力即为最大力。

3）拟合曲线与力-位移曲线在最大力之后曲线急剧下降开始时的交点所对应的力，即为不稳定裂纹扩展起始力。

4）力-位移曲线急剧下降终止时与其后的力-位移拟合曲线的交点所对应的力，即为不稳定裂纹扩展终止力。

**4. 位移特征值的确定**

按确定的力特征值所对应的横坐标确定位移特征值，当力-位移曲线与横坐标不相交时，用 $F=0.02F_m$ 所对应的横坐标作为终点来计算总位移。

**5. 冲击能量特征值的确定**

1）力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_m$ 的面积即为最大力时的能量。

2）力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_{iu}$的面积即为不稳定裂纹扩展起始能量。

3）力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_a$ 的面积即为不稳定裂纹扩展终止能量。

4）力-位移曲线下从 $s=0$ 到 $s=s_t$ 的面积即为总冲击能量。

**6. 韧性断面率的确定**

在力-时间或力-位移曲线变化过程中，如果力没有发生急剧下降，则断裂表面的韧性断面率可定义为断裂表面的 100%。如果力发生急剧下降，则下降的数量与力的特征值有关。韧性断面率的确定按下式计算：

$$C_1=\left[1-\frac{F_{iu}-F_a}{F_m}\right]\times 100\%$$

$$C_2=\left[1-\frac{F_{iu}-F_a}{F_m+(F_m-F_{gy})}\right]\times 100\%$$

$$C_3=\left[1-\frac{F_{iu}-F_a}{F_m+K(F_m-F_{gy})}\right]\times 100\%$$

$$C_4=\left[1-\sqrt{\frac{\frac{F_{gy}}{F_m}+2}{3}}\times\left[\frac{\sqrt{F_{iu}}}{\sqrt{F_m}}-\frac{\sqrt{F_a}}{\sqrt{F_m}}\right]\right]\times 100\%$$

式中　$C_1$、$C_2$、$C_3$、$C_4$——韧性断面率（%）

$F_m$——最大力，单位为 N；

$F_a$——不稳定裂纹扩展终止力，单位为 N；

$F_{iu}$——不稳定裂纹扩展起始力，单位为 N；

$F_{gy}$——屈服力，单位为 N；

$K$——系数，一般取 0.5。

## 4.5　焊接接头冲击试验

焊接接头冲击试验按照 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》进行。

### 4.5.1　试样

焊接接头冲击试验用试样应从焊接接头上截取，试样的纵轴与焊缝长度方向垂直。试样的性质一般用符号表示，符号中的字母说明试样类型、位置和缺口方向，而数字表明缺口距参考线和焊缝表面的距离。符号由下列字母组成：

1）第一个字母：U 为夏比 U 型缺口，V 为夏比 V 型缺口。

2）第二个字母：W 为缺口在焊缝，H 为缺口在热影响区。

3）第三个字母：S 为缺口面平行于焊缝表面，T 为缺口面垂直于焊缝表面。

4）第四个字母：$a$ 为缺口中心线距参考线的距离（如果缺口中心线与参考线重合，则记录 $a=0$）。

5）第五个字母：$b$ 为试样表面距焊缝表面的距离（如果试样表面在焊缝表面，则记录 $b=0$）。

焊接接头冲击试验试样的表示方法如表 4-7 和表 4-8 所示，典型符号示例如图 4-14

所示。

**表 4-7　S 位置**

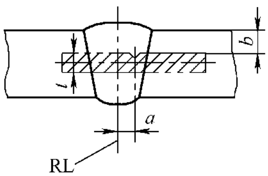
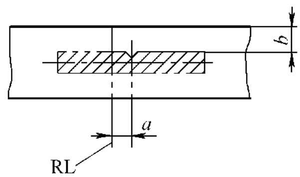
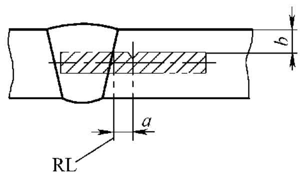
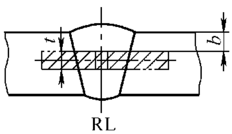
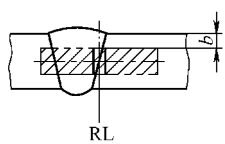
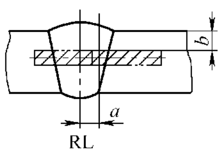
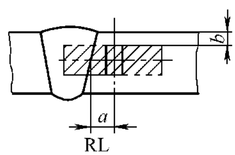
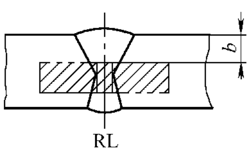
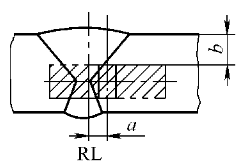
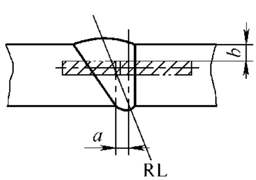
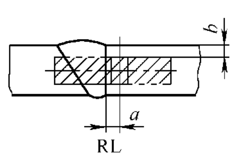
<table>
<tr><th rowspan="2">符号</th><th>缺口在焊缝</th><th rowspan="2">符号</th><th>缺口在热影响区</th></tr>
<tr><th>示意图</th><th>示意图</th></tr>
<tr><td rowspan="2">VWS a/b</td><td rowspan="2">
</td><td>VHS a/b<br>(压焊)</td><td>
</td></tr>
<tr><td>VHS a/b<br>(熔焊)</td><td>
</td></tr>
</table>

**表 4-8　T 位置**

<table>
<tr><th rowspan="2">符　号</th><th>缺口在热影响区</th><th rowspan="2">符　号</th><th>缺口在热影响区</th></tr>
<tr><th>示意图</th><th>示意图</th></tr>
<tr><td>VWT 0/b</td><td>
</td><td>VHT 0/b</td><td>
</td></tr>
<tr><td>VWT a/b</td><td>
</td><td>VHT a/b</td><td>
</td></tr>
<tr><td>VWT 0/b</td><td>
</td><td>VHT a/b</td><td>
</td></tr>
<tr><td>VWT a/b</td><td>
</td><td>VHT a/b</td><td>
</td></tr>
</table>

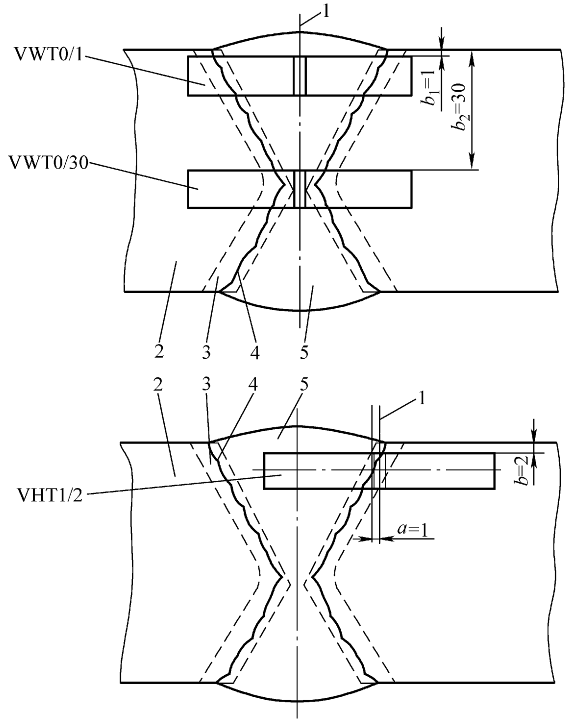



图 4-14　典型符号示例

1—缺口轴线　2—母材　3—热影响区　4—熔合线　5—焊缝金属

### 4.5.2　其他试验要求

其他试验要求均与金属材料夏比摆锤冲击试验完全相同。

## 4.6　硬质合金常温冲击试验

硬质合金常温冲击试验按照 GB/T 1817—1995《硬质合金常温冲击韧性试验方法》进行。

### 4.6.1　试样

1）采用无缺口正方形截面试样，试样的形状和尺寸如图 4-15 和表 4-9 所示。

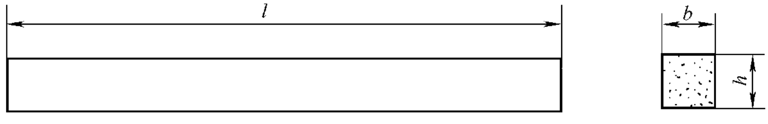



图 4-15　试样的形状

表 4-9 试样的尺寸 （单位：mm）

| 试样尺寸 | | | 挠度 |
|---|---|---|---|
| 长度 $l$ | 宽度 $b$ | 高度 $h$ | |
| 5 ±1 | 5 ±0.3 | 5 ±0.3 | <0.2 |

2）试样表面应经喷砂处理，不允许有划痕、裂纹、掉边、毛刺及粘料、填料和其他脏物。

3）试样标志应在半成品时就刻好，并要求刻在试样的端部。

4）钳口跨距规定为30mm。

## 4.6.2 试验设备

**1. 冲击试验机**

硬质合金材料冲击试验，采用具有 3～10J 冲击能量摆锤式冲击试验机。冲击试验机应符合 GB/T 3808 的规定。试验机应由国家计量部门定期检定。

**2. 摆锤刀刃**

摆锤刀刃材料应适用于硬质合金常温冲击试验。

**3. 机座**

冲击试验机应稳固安装在基础上。安装时必须用精度 0.2/1000 水平仪对其前后左右进行水平校正。若安装在可移动基座上，基座质量应大于该冲击试验机摆锤质量的 40 倍，并且要求有足够的刚度。

## 4.6.3 试验内容及结果表示

**1. 试验准备**

1）检查摆锤铅垂时，主动指针和被动指针是否指示在最大冲击能量处，以及摆锤空击时，被动指针是否平稳地移至零位。

2）用冲击试验机专用样规检查试验机钳口跨距是否正确，摆锤刀刃是否在钳口中心位置。若有偏差应予以调整。

**2. 试样的测试**

1）5 根试样为一组，用精度为 0.02mm 的游标卡尺测量每根试样中部位置的高度和宽度，并检查每根试样的挠度。

2）将试样平稳地放置于已校正的钳口支座上。

3）扳动冲击手柄进行冲击试验。

4）准确读出并记录冲击试验机所指示的冲击吸收能量（原称冲击消耗功），读数要求保留至小数点后两位数。

5）被击断试样上发现有空洞或冲击时有卡锤现象应重新取样测定。

**3. 试验结果**

利用摆锤在冲断试样前后的能量差来确定试样冲击吸收能量试验原理示意图如图 4-16 所示。

冲击吸收能量由下式计算：

$$K = E_A - E_B = mgL(\cos\beta - \cos\alpha)$$
$$E_A = mgL(1 - \cos\alpha)$$
$$E_B = mgL(1 - \cos\beta)$$

式中　$E_A$——冲断试样前摆锤具有的能量，单位为 J；
$E_B$——冲断试样后摆锤具有的能量，单位为 J；
$K$——冲击吸收能量，单位为 J；
$L$——摆锤旋转轴线到摆锤重心的距离，单位为 m；
$\alpha$、$\beta$——试样冲断前、后摆锤扬起角，单位为（°）；
$m$——摆锤质量，单位为 kg；
$g$——重力加速度，单位为 $m/s^2$。

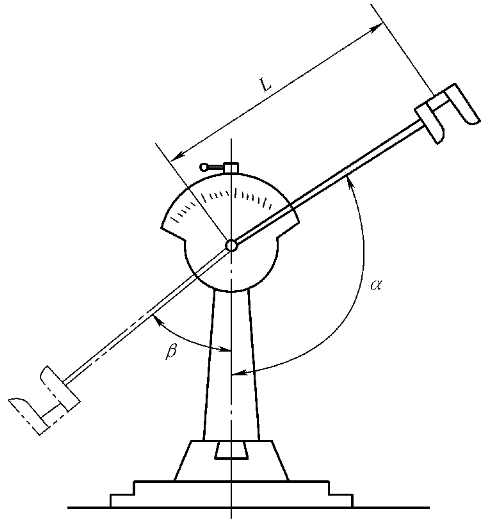


图 4-16　试验原理图

冲击韧度按下式计算：

$$a_K = \frac{K}{S}$$

式中　$a_K$——冲击韧度，单位为 $J/cm^2$；
$K$——冲击吸收能量，单位为 J；
$S$——试样横截面积，单位为 $cm^2$。

## 4.7　烧结金属材料冲击试验

烧结金属材料冲击试验相关标准是 GB/T 5318—1985《烧结金属材料（不包括硬质合金）无切口冲击试样》。

该试验规定了烧结金属材料（不包括硬质合金）在室温下进行冲击试验的方法，适用于测定简支梁（夏比）状态的烧结金属试样在一次冲击负荷作用下折断时的冲击吸收能量。

### 4.7.1　试样

1）试样可以直接由金属粉末压制—烧结制成，也可以由烧结金属制品加工制成。

2）试样分无缺口和带缺口两类。烧结金属材料通常采用无缺口试样，只有某些特殊材料，如低孔隙度或高延展性材料，才选用带缺口试样。

3）无缺口和 U 型缺口试样分别如图 4-17 和图 4-18 所示。

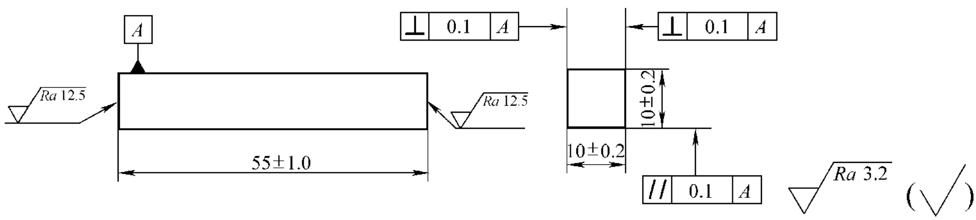



图 4-17　无缺口试样

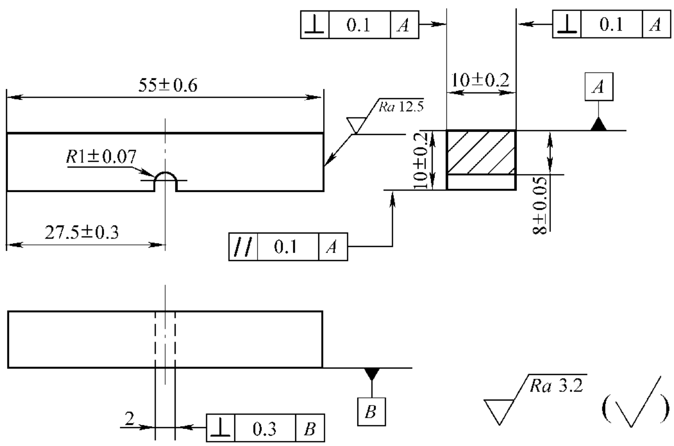



图 4-18　U 型缺口试样

4）试样应有可以辨认压制方向的标记。如果用毛坯加工制作的试样，应预先标记压制方向。

5）试样不允许有任何表面缺陷。制备试样时，应使发热或加工硬化等对试验结果产生的影响降至最小。

6）在烧结毛坯或零件上切取试样时，可参照 GB/T 2975 进行。

## 4.7.2　试验设备

1）采用标准冲击能量为 30J/50J、打击瞬间摆锤的冲击速度为 3.0～5.0m/s 的冲击试验机。特殊材料允许选择其他能量的摆锤式冲击试验机。

2）冲击试验机的其他技术条件应符合 GB/T 3808 的规定，并应定期按 JJG 145 检定。

3）测量试样尺寸用量具的最小分度值应不大于 0.02mm。

## 4.7.3　试验内容及结果表示

1）试验应在 10～35℃进行，超出此温度范围应在试验报告中注明。

2）冲击试验机的正常使用范围为其摆锤最大冲击能量的 10% ~90%。

3）试验前应检查摆锤空打时被动指针的回零差，回零差不应超过最小分度值的 1/4。

4）试样的放置应使压制方向与冲击方向垂直（另有规定除外）。带缺口试样应使缺口背面承受摆锤的冲击。

5）试样应紧贴支座放置。试样长度的对称面与两支座对称面重合，其偏差应不大于 0.5mm。

6）发生下列现象试验无效：①试样断口处发现各种烧结缺陷或明显淬火裂纹；②试验过程中有卡锤现象。

7）从试验机刻度盘上直接读取冲击吸收能量 $K$ 的数值。读数应精确至刻度盘的最小分度。

8）如果由于冲击试验机的冲击能量不足而未能使试样折断时，应在 $K$ 数值前加符号“>”。

9）需要给出冲击韧度时，则按下式计算：

$$a_K = \frac{K}{S}$$

式中　$a_K$——冲击韧度，单位为 $J/cm^2$；

$K$——冲击吸收能量，单位为 J；

$S$——试样折断处的横截面积，单位为 $cm^2$。

注：无缺口试样的 $S$ 为试样中间部位的横截面面积，带缺口试样的 $S$ 为由缺口底部截取的横截面面积。

10）试验结果按 GB/T 8170 的有关规定修约至 3 位有效数字。

## 4.8　硬质塑料落锤冲击试验

硬质塑料落锤冲击试验按照 GB/T 14153—1993《硬质塑料落锤冲击试验方法　通则》进行。

### 4.8.1　试样

**1. 形状及尺寸**

（1）管材　管材公称外径小于或等于 75mm 时，从 5 根管上沿长度方向分别截取 100mm 长的试样。公称外径大于 75mm 时，从 5 根管材上沿长度方向分别截取 200mm 长的试样。

（2）板材　从 5 块板材上距边缘不小于 100mm 处分别截取 200mm×200mm 的正方形试样。厚度为板材原厚。

（3）异型材　从 5 根异型材上沿挤出方向各截取 200mm 长的试样。

（4）管件及硬质塑料零部件　保持原形状的整体试样。

**2. 制备**

试样不得有裂纹，端口平整，对管材和异型材试样，两端应与轴线垂直切平。

**3. 数量**

通过法（采用一定质量的落锤在规定高度下冲击试样，一般用于产品的质量控制）10个；梯度法（采用变换冲击高度或落锤质量冲击试样的方法而获得冲击破坏能）25个以上。

## 4.8.2　试验设备

**1. 试验机**

符合JB/T 9389要求的各种落锤式冲击试验机。

**2. 落锤**

1）落锤质量分为0.5kg、1kg、2kg、3kg、4kg、5kg、6kg、8kg、10kg、15kg。

2）落锤锤头半径分为30mm、10mm、5mm三种。

**3. 夹具**

1）管材试样采用V形夹具，夹角为120°，长度200 mm。使试样稳固地夹在V形槽内。

2）板材或异型材等所用夹具形状不作具体规定，但必须保证以下几点：①夹具必须能够将试样夹紧，保证其在受冲击时不发生位移；②夹具夹紧点必须与支承点重合，夹力不可过大，以免试样变形；③夹具装上后的中心线必须与落锤中心线重合，其误差不得大于2.5mm。

## 4.8.3　试验内容及结果表示

1）按GB/T 2918中规定的标准环境与正常偏差范围进行调节，时间不小于48h，并在此环境下进行试验。

2）试样需进行高低温冲击试验时，可按产品标准中的有关规定或用户要求的试验条件进行，冲击试样离开预处理环境状态后15s内完成。

3）将试样水平放置在夹具上，有困难时，可采用垫片等加以调整、固定。

4）采用通过法时，按产品标准中规定的冲击高度及落锤质量对10个试样依次进行冲击。

5）采用梯度法时，首先确定初始冲击高度和落锤质量。试验时，第一个试样若未被破坏，测第二个试样时，高度增高一个增量$d$（m）。若第一个试样已破坏，高度则下降一个增量$d$（m）。直至试样达到50%破坏时为止。每组试样至少20个。

6）对管材或对称管件，沿圆周方向冲击，冲击点选在垂直直径的顶部；对板材试样冲击点选在中心部位；对于不对称管件或异型材用一半试样先冲击一面，剩下一半再冲击另一面。每个试样只允许冲击一次。试样受冲击后造成的裂纹和破碎均为破坏。

7）通过法：按产品标准中有关规定处理。若无规定，10个试样中有6个以上不破坏为合格。

8）梯度法：50%冲击破坏高度按下式计算：

$$H_{50}=H_1+d\left[\frac{\sum(in_i)}{N}\pm\frac{1}{2}\right]$$

式中　$H_{50}$——50%冲击破坏高度，单位为m；

$H_1$——试验初始高度（预测的试验破坏高度），单位为 m；

$d$——每次升降的试验高度，单位为 m；

$n_i$——各试验高度已破坏（或未破坏）的试样数；

$i$——设 $H_1$ 为 0 时，逐个增减的高度水准（$i=\cdots-3，-2，-1，0，1，2，3\cdots$）；

$N$——已破坏（或未破坏）试样之总数；

$\pm\frac{1}{2}$——使用已破坏的数据时取负号，使用未破坏的数据时取正号。

9）50% 冲击破坏能按下计算：

$$E_{50}=mgH_{50}$$

式中　$E_{50}$——50% 冲击破坏能，单位为 J；

$m$——落锤质量，单位为 kg；

$g$——重力加速度，一般取 9.81m/s$^2$；

$H_{50}$——50% 冲击破坏高度，单位为 m。

10）50% 冲击破坏高度的标准偏差按下式计算：

$$S=d\alpha$$

式中　$S$——标准偏差，单位为 m；

$d$——每次升降的试验高度，单位为 m；

$\alpha$——由下式求出 $M$ 值，再查表 4-10。

$$M=\frac{\sum(i^2n_i)}{N}-\left[\frac{\sum(in_i)}{N}\right]^2$$

式中　$n_i$——各试验高度已破坏（或未破坏）的试样数；

$i$——设 $H_1$ 为 0 时，逐个增减的高度水准（$i=\cdots-3，-2，-1，0，1，2，3\cdots$）；

$N$——已破坏（或未破坏）试样之总数。

**表 4-10　α 值表**

| $M$ | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.30 | 0.5102 | 0.5316 | 0.5518 | 0.5711 | 0.5897 | 0.6077 | 0.6253 | 0.6426 | 0.6597 | 0.6765 |
| 0.40 | 0.6932 | 0.7098 | 0.7263 | 0.7427 | 0.7591 | 0.7754 | 0.7917 | 0.8079 | 0.8242 | 0.8405 |
| 0.50 | 0.8567 | 0.8729 | 0.8892 | 0.9054 | 0.9216 | 0.9379 | 0.9541 | 0.9703 | 0.9866 | 1.0028 |
| 0.60 | 1.0190 | 1.0353 | 1.0515 | 1.0677 | 1.0839 | 1.1001 | 1.1164 | 1.1326 | 1.1488 | 1.1650 |
| 0.70 | 1.1812 | 1.1974 | 1.2135 | 1.2297 | 1.2459 | 1.2621 | 1.2783 | 1.2944 | 1.3106 | 1.3267 |
| 0.80 | 1.3429 | 1.3590 | 1.3752 | 1.3913 | 1.4075 | 1.4236 | 1.4397 | 1.4559 | 1.4720 | 1.4881 |
| 0.90 | 1.5043 | 1.5204 | 1.5365 | 1.5526 | 1.5687 | 1.5848 | 1.6009 | 1.6170 | 1.6331 | 1.6492 |
| 1.00 | 1.6653 | 1.6814 | 1.6975 | 1.7135 | 1.7294 | 1.7457 | 1.7618 | 1.7779 | 1.7939 | 1.8100 |
| 1.10 | 1.8261 | 1.8422 | 1.8582 | 1.8743 | 1.8904 | 1.9064 | 1.9225 | 1.9386 | 1.9546 | 1.9707 |
| 1.20 | 1.9867 | 2.0028 | 2.0188 | 2.0349 | 2.0509 | 2.0670 | 2.0830 | 2.0991 | 2.1151 | 2.1312 |
| 1.30 | 2.1472 | 2.1633 | 2.1793 | 2.1953 | 2.2114 | 2.2274 | 2.2435 | 2.2595 | 2.2755 | 2.2916 |
| 1.40 | 2.3076 | 2.3236 | 2.3397 | 2.3557 | 2.3717 | 2.3878 | 2.4038 | 2.4198 | 2.4358 | 2.4519 |
| 1.50 | 2.4679 | 2.4839 | 2.4999 | 2.5159 | 2.5320 | 2.5480 | 2.5640 | 2.5800 | 2.5960 | 2.6121 |
| 1.60 | 2.6281 | 2.6441 | 2.6601 | 2.6761 | 2.6921 | 2.7082 | 2.7242 | 2.7420 | 2.7562 | 2.7722 |
| 1.70 | 2.7882 | 2.8042 | 2.8202 | 2.8362 | 2.8523 | 2.8683 | 2.8845 | 2.9003 | 2.9163 | 2.9323 |
| 1.80 | 2.9483 | 2.9643 | 2.9803 | 2.9963 | 3.0123 | 3.0283 | 3.0443 | 3.0603 | 3.0763 | 3.0923 |

（续）

| M | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.90 | 3.1033 | 3.1243 | 3.1403 | 3.1563 | 3.1723 | 3.1883 | 3.2043 | 3.2203 | 3.2363 | 3.2523 |
| 2.00 | 3.2683 | 3.2843 | 3.3003 | 3.3163 | 3.3323 | 3.3483 | 3.3643 | 3.3803 | 3.3963 | 3.4123 |
| 2.10 | 3.4283 | 3.4443 | 3.4603 | 3.4763 | 3.4923 | 3.5083 | 3.5243 | 3.5402 | 3.5562 | 3.5722 |
| 2.20 | 3.5882 | 3.6043 | 3.6202 | 3.6362 | 3.6522 | 3.6682 | 3.6841 | 3.7001 | 3.7161 | 3.7321 |
| 2.30 | 3.7481 | 3.7641 | 3.7801 | 3.7961 | 3.8121 | 3.8280 | 3.8440 | 3.8600 | 3.8760 | 3.8920 |
| 2.40 | 3.9080 | 3.9240 | 3.9400 | 3.9560 | 3.9720 | 3.9879 | 4.0039 | 4.0199 | 4.0359 | 4.0619 |
| 2.50 | 4.0678 | 4.0838 | 4.0998 | 4.1158 | 4.1318 | 4.1477 | 4.1637 | 4.1797 | 4.1957 | 4.2117 |
| 2.60 | 4.2277 | 4.2436 | 4.2596 | 4.2756 | 4.2916 | 4.3075 | 4.3235 | 4.3395 | 4.3555 | 4.3715 |
| 2.70 | 4.3874 | 4.4034 | 4.4194 | 4.4354 | 4.4514 | 4.4673 | 4.4833 | 4.4993 | 4.5153 | 4.5313 |
| 2.80 | 4.5472 | 4.5632 | 4.5792 | 4.5952 | 4.6111 | 4.6271 | 4.6431 | 4.6591 | 4.6750 | 4.6910 |
| 2.90 | 4.7070 | 4.7230 | 4.7390 | 4.7549 | 4.7709 | 4.7869 | 4.8029 | 4.8188 | 1.8348 | 4.8504 |
| 3.00 | 4.8668 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

示例：设1kg的重锤，对20个试样（$d=0.1\text{m}$）进行试验后，10个破坏，其余10个未破坏，如表4-11所示。

**表4-11　试验记录表**

| 试验高度/cm | 水准 $i$ | 试验结果（×：破坏；○：不破坏） | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | $n_i$ | | $in_i$ | $i^2n_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | ○ | × | | |
| 110 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 1 | | | | | | × | | | | | | | | × | | | | × | | × | 0 | 4 | 4 | 4 |
| 90 ($H_1$) | 0 | × | | | | ○ | | × | | × | | × | | ○ | | × | | ○ | | ○ | | 4 | 5 | 0 | 0 |
| 80 | −1 | | × | | ○ | | | | ○ | | ○ | | ○ | | | | ○ | | | | | 5 | 1 | −1 | 1 |
| 70 | −2 | | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 0 | 0 | 0 |

50%的破坏高度 $H_{50}$ 按公式计算：

$$H_{50}=H_1+d\left[\frac{\Sigma(in_i)}{N}-\frac{1}{2}\right]$$

$$=0.9\text{m}+0.1\left(\frac{3}{10}-\frac{1}{2}\right)\text{m}$$

$$=0.88\text{m}$$

50%的破坏高度 $E_{50}$ 按公式计算：

$$E_{50}=mgH_{50}$$

$$=1\times9.81\times0.88\text{J}$$

$$=8.6\text{J}$$

$M$ 值由公式计算：

$$M=\frac{\Sigma(i^2n_i)}{N}-\left[\frac{\Sigma(in_i)}{N}\right]^2$$

$$=\frac{5}{10}-\left(\frac{3}{10}\right)^2$$

$$=0.41$$

由表 4-10 查得 $\alpha = 0.7098$。

50% 的破坏高度的标准偏差 $S$ 按公式计算：

$$S = d\alpha$$
$$= 0.1 \times 0.7098\text{m}$$
$$= 0.07098\text{m}$$

# 4.9　塑料悬臂梁冲击试验

塑料悬臂梁冲击试验按照 GB/T 1843—2008《塑料　悬臂梁冲击强度的测定》进行。

## 4.9.1　试样

**1. 材料**

1）硬质热塑性模塑和挤塑材料，包括填充和增强复合材料、未填充类型的材料；硬质热塑性板材。

2）硬质热固性模塑材料，包括填充和增强复合材料；硬质热固性板材，包括层压板。

3）纤维增强热固性和热塑性复合材料，包括含有单向或非单向的增强材料，如毡、织物、纺织粗纱、短切原丝、复合增强材料、无捻粗纱及磨碎纤维及由预浸料制成的板材。

4）热致液晶聚合物。

5）通常不适用于硬质泡沫材料及含有泡沫材料的夹层结构材料。缺口试样通常不适用于长纤维增强的复合材料或热致液晶聚合物。

6）适用于模塑至所选尺寸的试样，由标准多用途试样（见 GB/T 11997）的中部机加工制成的试样，或由成品或半成品，如模塑件、层压板、挤塑或浇铸板材机加工制成的试样。

**2. 制备**

（1）模塑和挤塑材料　材料应按相关的材料标准制备，若没有这种标准或另有规定外，试样应该按 GB/T 9352—2008、GB/T 19037.1—1997、GB/T 5471—2008 或 ISO 10724-1：1998 相应的标准直接压塑或注塑，或者由材料压塑或注射的板材机加工而成。试样也可由符合 GB/T 11997—2008 中的 A 型多用途试样切割而成。

（2）板材　试样应按 ISO 2818：1994 由板材机加工而成，尽可能使用 A 型缺口。测试时，无缺口试样的机加工表面不应处于拉伸状态。

（3）长纤维增强材　应按 ISO 1268 制成平板或按其他标准方法或协商的方法制备。试样应按 ISO 2818：1994 机加工而成。

（4）检查　试样不应翘曲，相对表面应互相平行，相邻表面应相互垂直。所有表面和边缘应无刮痕、麻点、凹陷和飞边。应用直尺、直角尺和平板目测或用测微计测量试样是否符合上述的要求，如有一项达不到要求，则试样应报废或在试验前加工成符合

要求的试样。

（5）缺口的加工　应按 ISO 2818：1994 机加工方法制备缺口。切削齿的形状能将试样切削出图 4-19 所示的试样缺口形状，切削齿的剖面应与其主轴成直角。缺口的形状应定期检查。如果受试材料有规定，可使用模塑缺口试样，测试结果同机加工缺口试样结果不可比。缺口的形状应定期检查。

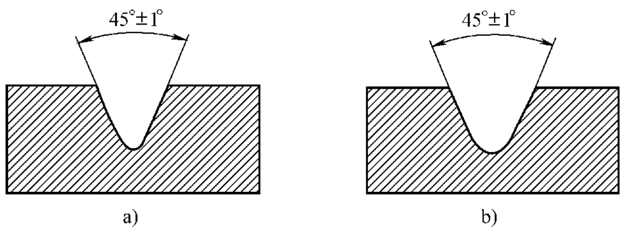



图 4-19　缺口类型

a）A 型　b）B 型

**3. 各向异性材料**

某些板材随板材方向的不同，可能具有不同的冲击性能。对于这种板材应按平行和垂直某一特征方向分别切取一组试样。板材的特征方向可目视观察或由生产方法推断。

**4. 形状和尺寸**

（1）通则　试样尺寸如表 4-12 所示，需要时，使用可对称地将试样的长度减至 63.5mm。缺口的纵向总是平行于厚度 $t$。

**表 4-12　方法名称、试样类型、缺口类型和缺口尺寸**　　（单位：mm）

| 方法名称 | 试样 | 缺口类型 | 缺口底部半径 $r_N$ | 缺口的保留宽度 $b_N$ |
|---|---|---|---|---|
| GB/T 1843/U | 长度 $l$ = 80 ± 2 | 无缺口 | — | — |
| GB/T 1843/A | 宽度 $b$ = 10.0 ± 0.2 | A | 0.25 ± 0.05 | 8.0 ± 0.2 |
| GB/T 1843/B | 厚度 $t$ = 4.0 ± 0.2 | B | 1.00 ± 0.05 | |

注：1. 如果试样是由板材或制品上裁取的，板材或制品的厚度 $t$ 应该加到命名中。未增强的试样不应使机加工表面处于拉伸状态进行试验。

2. 如果板材厚度 $t$ 等于宽度 $b$，冲击方向（垂直 n 或平行 p）应该加到名称中。

（2）模塑和挤塑材料　按表 4-12 的规定及图 4-19 所示，试样应使用一种类型的缺口，缺口应处于试样的中间。优选的缺口类型是 A 型，如果要获得材料缺口敏感性的信息，应试验 A 型和 B 型缺口的试样。

（3）板材（包括长纤维增强的材料）　推荐的厚度 $t$ 为 4mm。如果试样是从板材或构件上切取的，其厚度应与板材或构件的原厚相同，至多不超过 10.2mm。

对于厚度均匀，并且只含有一种规则分布增强料的板材，当其厚度大于 10.2mm 时，则从板材一面机加工到 10.2mm ± 0.2mm。对于无缺口试样，为了避免表面的影响，试验中应使试样原始表面处于拉伸状态。

试验时冲击试样的侧面，冲击方向平行于板平面。只是在 $t = b = 10$mm 时，才可平

行或垂直于板面进行试验。

**5. 试样数量**

1）除受试材料标准另有规定外，一组试样应为10个。当变异系数小于5%时，测试5个试样即可。

2）如果在垂直和平行方向试验层压材料，则每个方向应试验10个试样。

**6. 状态调节**

除受试材料标准另有规定外，试验应按GB/T 2918在23℃和50%相对湿度下至少状态调节16h，或按有关各方协商的条件。缺口试样应在缺口加工后计算状态调节时间。

## 4.9.2 试验设备

**1. 试验机**

试验机的原理、特性和鉴定详见GB/T 21189—2007。

某些塑料对夹持力很敏感，当试验这类材料时，应以标准化的夹持力方式，并在试验报告中注明夹持力的大小。可采用经校准的指示式扭力扳手或在台虎钳加紧的螺钉上配以气动或液压装置来控制夹持力。

**2. 测微计和量规**

用精度0.02mm的测微计或量规测量试样的主要尺寸。为了测量缺口试样的尺寸，应在测微计上安装一个测量头，其宽度为2～3mm，其外形应适合缺口的形状。

## 4.9.3 试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

由已知能量的摆锤一次冲击支撑成垂直悬臂梁的试样，测量试样破坏时所吸收的能量。冲击线到试样夹具为固定距离，对于缺口试样，冲击线到缺口中心线为固定距离，如图4-20所示。

**2. 冲击方向**

（1）平行冲击（p）（层压增强塑料）冲击方向平行于增强材料层压面，如图4-21所示。悬臂梁冲击试验中冲击方向通常为“侧向平行”。

（2）垂直冲击（n）（层压增强塑料）冲击方向垂直于增强材料层压面，如图4-21所示。悬臂梁冲击试验不常用这种方法。

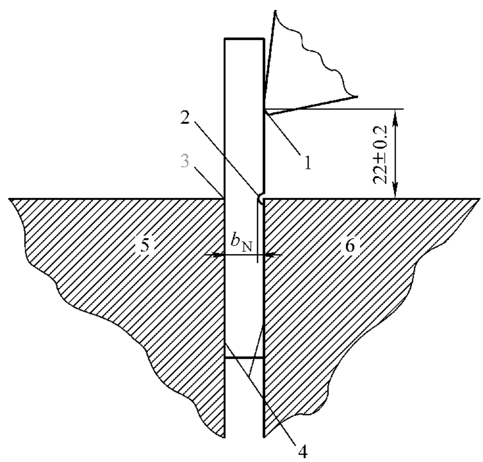



图4-20 夹具、试样（缺口）和冲击刃冲击示意图

1—冲击刃 2—缺口 3—夹具梭圆角

4—与试样接触的夹具面

5—固定夹具 6—活动夹具

$b_N$—缺口底部剩余宽度（8mm±0.2mm）

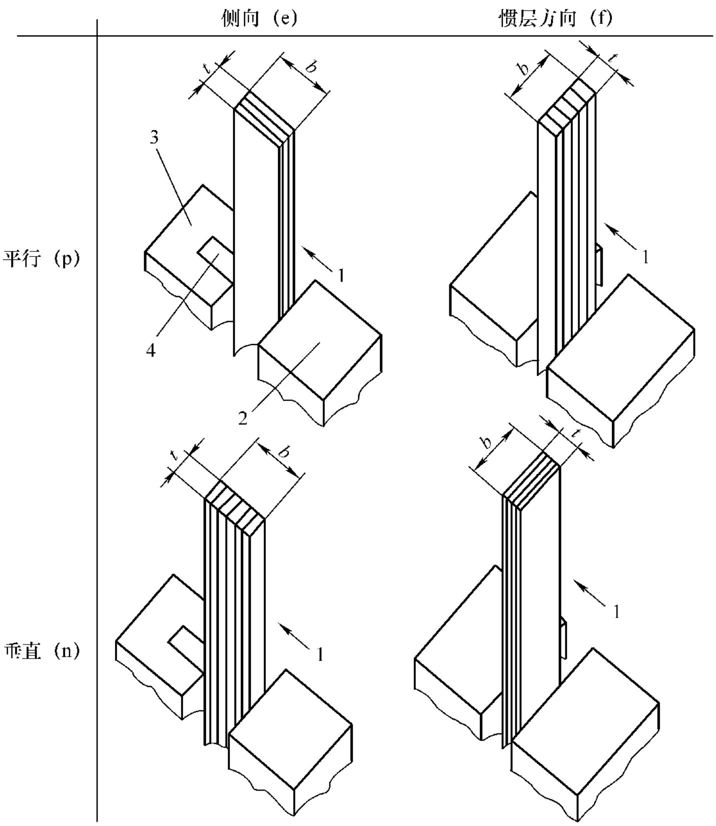



图 4-21　冲击方向的命名图

1—冲击方向　2—可移动台虎钳钳口　3—固定台虎钳钳口　4—附加的导槽

注：侧向（e）和惯层方向（f）指示的是与试样原厚 $t$ 和试样宽度 $b$ 有关的冲击方向。垂直（n）和平行（p）指的是与层合有关的冲击方向。常用的悬臂梁试验是“侧向平行”。当 $t=b$ 时，平行以及垂直冲击试验都是可以的。

**3. 试验步骤**

1）除有关方面同意采用别的条件（如在高温或低温下试验）外，都应在与状态调节相同的环境中进行试验。

2）测量每个试样中部的厚度 $t$ 和宽度 $b$ 或缺口试样的剩余宽度，精确至 0.02mm。试样是注塑件时，不必测量每一个试样尺寸。只要确保尺寸，一组中只测量一个试样即可。使用多模腔模具时，要保证每个模腔中试样的尺寸都是相同的。

3）确定试验机是否有规定的冲击速度和合适的能量范围，冲断试样吸收的能量应在摆锤标称能量 10% ~80% 范围内。如果不止一个摆锤符合这些要求，应选择其中能量最大的摆锤。

4）按 GB/T 21189—2007 测定摩擦损失和修正的吸收能量。

5）抬起并锁住摆锤，按要求安装试样，并符合相关要求。当测定缺口试样时，缺口应在摆锤冲击刃的一侧。

6）释放摆锤，记录被试样吸收的冲击能量，并对其摩擦损失等进行必要的修正。

7）用以下字符命名冲击的四种类型：①C（完全破坏），试样断开成两段或多段；②H（铰链破坏）试样没有刚性的很薄表皮连在一起的一种不完全破坏；③P（部分破坏）除铰链破坏外的不完全破坏；④N（不破坏）未发生破坏，只是弯曲变形，可能有应力发白的现象产生。

**4. 计算和结果的表示**

（1）无缺口试样　悬臂梁无缺口冲击强度（无缺口试样在悬臂梁冲击强度破坏过程中所吸收的能量与试样原始横截面积之比）按下式计算：

$$a_{iU} = \frac{E_c}{tb} \times 10^3$$

式中　$a_{iU}$——悬臂梁无缺口冲击强度，单位为 kJ/m²；

$E_c$——已修正的试样断裂吸收能量，单位为 J；

$t$——试样厚度，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm。

（2）缺口试样　悬臂梁缺口冲击强度按下式计算：

$$a_{iN} = \frac{E_c}{tb_N} \times 10^3$$

式中　$a_{iN}$——悬臂梁缺口冲击强度，单位为 kJ/m²；

$E_c$——已修正的试样断裂吸收能量，单位为 J；

$t$——试样厚度，单位为 mm；

$b_N$——试样剩余宽度，单位为 mm。

（3）数值修约　计算一组试验结果的算术平均值，按 GB/T 8170 进行修约，取 2 位有效数字。

（4）结果表示　试验结果表示方法如表 4-13 所示。

**表 4-13　试验结果表示方法**

| 破坏类型 | | | 命名 |
|---|---|---|---|
| C | P | N | |
| x | * | * | xC* |
| x | (P) | * | xC(P) |
| x | * | (N) | xC(N) |
| * | x | * | xP* |
| (C) | x | * | xP(C) |
| * | x | (N) | xP(N) |
| * | * | N | N* |
| (C) | * | N | N(C) |
| * | (P) | N | N(P) |

注：1. x 表示最常见破坏类型的冲击强度的平均值，不包括 N 型。

2. C、P 或 N 表示最常见破坏的类型。

3.（C）、（P）或（N）表示频率高于 1/3 时的次常见破坏类型，记录次之的破坏类型。

4. * 表示不涉及。

# 4.10　塑料冲击性能小试样试验

塑料冲击性能小试样试验按照 HG/T 3841—2006《塑料冲击性能小试样试验方法》进行。

## 4.10.1　试样

**1. 材料**

塑料冲击性能小试样试验适用于硬质热塑性塑料和热固性塑料，不适用于增强塑料。

**2. 试样尺寸**

试样尺寸及支撑线间的距离如表 4-14 所示。

**表 4-14　试样尺寸及支撑线间距离**　（单位：mm）

| 长度 $l$ | | 宽度 $b$ | | 厚度 $t$ | | 支撑线间距离 $L$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 基本尺寸 | 极限偏差 | 基本尺寸 | 极限偏差 | 基本尺寸 | 极限偏差 | |
| 40 | ±1 | 3 | ±0.2 | 2 | ±0.2 | 20 |

**3. 试样的缺口**

1）缺口类型和缺口尺寸如表 4-15 所示。

**表 4-15　缺口类型和缺口尺寸**　（单位：mm）

| 缺口类型 | 缺口剩余厚度 $t_k$ | 缺口底部圆弧半径 $r$ | | 缺口宽度 $n$ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 基本尺寸 | 极限偏差 | 基本尺寸 | 极限偏差 |
| A | 0.8$t$ | 0.25 | ±0.05 | — | — |
| B | 0.8$t$ | 1.0 | ±0.05 | — | — |
| C | 2/3$t$ | <0.1 | — | 0.8 | ±0.1 |

2）A 型缺口试样如图 4-22 所示。

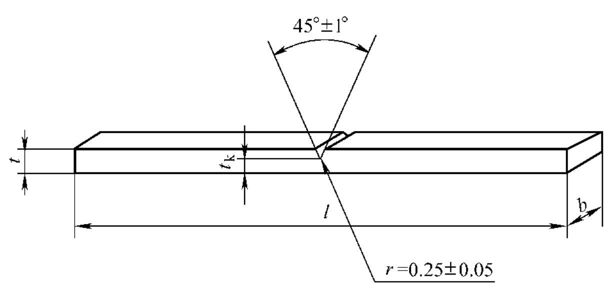



图 4-22　A 型缺口试样

$l$—试样长度（mm）　$t$—试样厚度（mm）　$r$—缺口底部半径（mm）

$b$—试样宽度（mm）　$t_k$—试样缺口剩余厚度（mm）

3）B 型缺口试样如图 4-23 所示。

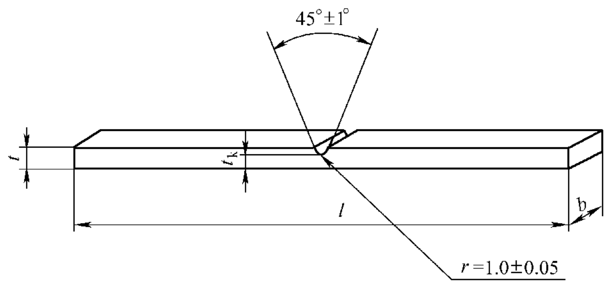



图 4-23　B 型缺口试样

$l$—试样长度（mm）　$t$—试样厚度（mm）　$r$—缺口底部半径（mm）

$b$—试样宽度（mm）　$t_k$—试样缺口剩余厚度（mm）

4）C 型缺口试样如图 4-24 所示。

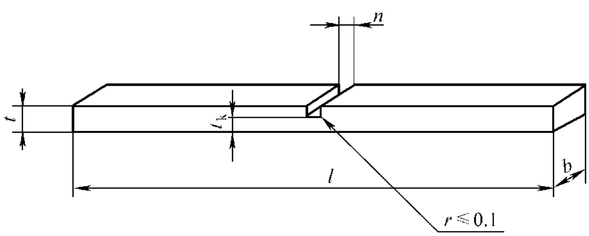



图 4-24　C 型缺口试样

$l$—试样长度（mm）　$t$—试样厚度（mm）　$r$—缺口底部半径（mm）

$b$—试样宽度（mm）　$t_k$—试样缺口剩余厚度（mm）

**4. 试样选择**

硬质脆性材料采用无缺口试样，其他材料采用缺口试样，推荐缺口类型为 A 型。

**5. 试样制备及要求**

1）试样制备和外观检查按 GB/T 1040. 1 规定进行。

2）试样缺口可在铣床、刨床或专用缺口加工机上加工。加工刀具应无倾角，刀刃工作后角为 15°～20°。

3）刀尖线速度为 90～185m/min，给进速度为 10～130mm/min。

4）每一加工刀具在加工 500 个缺口后应检查刀刃的锐度，如果半径和外形不在规定范围内时，应更换刀具。

**6. 试样数量**

每组试样不少于 10 个。

## 4.10.2　试验设备

冲击试验机按 GB/T 1043. 1 中的要求，冲击能量规定在 4J 以下。

### 4.10.3 试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）测量试样中部的宽度和厚度，精确至0.01mm。缺口试样应测量缺口处剩余厚度，测量时应在缺口两端各测一次，取其算术平均值。

2）根据试样破坏所需的能量选择摆锤，使消耗的能量在摆锤总能量的10%～85%范围内。

3）调节支撑线间距离为20mm。

4）抬起并锁住摆锤，将试样放置在两支撑块上，试样支撑面紧贴在支撑块上，使冲击刀刃对准试样中缺口背向的中心位置。

5）平稳释放摆锤，从度盘上读取试样吸收的冲击能量。

6）试样无破坏的冲击值不取值，试样完全破坏或部分破坏的可以取值。

**2. 结果计算和表示**

1）无缺口试样简支梁冲击强度按下式计算：

$$a=\frac{A}{bt}\times 10^3$$

式中 $a$——无缺口试样简支梁冲击强度，单位 $kJ/m^2$；
$A$——试样吸收的冲击能量，单位为J；
$b$——试样宽度，单位为mm；
$t$——试样厚度，单位为mm。

2）缺口试样简支梁冲击强度按下式计算：

$$a_k=\frac{A_k}{bt_k}\times 10^3$$

式中 $a_k$——缺口试样简支梁冲击强度，单位 $kJ/m^2$；
$A_k$——试样吸收的冲击能量，单位为J；
$b$——试样宽度，单位为mm；
$t_k$——缺口试样缺口处剩余厚度，单位为mm。

3）试验结果以一组试样的算术平均值表示，按GB/T 8170进行修约，取2位有效数字。

## 4.11 纤维增强塑料简支梁式冲击试验

纤维增强塑料简支梁式冲击试验按照GB/T 1451—2005《纤维增强塑料简支梁式冲击韧性试验方法》进行。

### 4.11.1 试样

1）缺口方向与布层垂直的纤维织物试样如图4-25所示。

2）缺口方向与布层平行的纤维织物试样如图4-26所示。

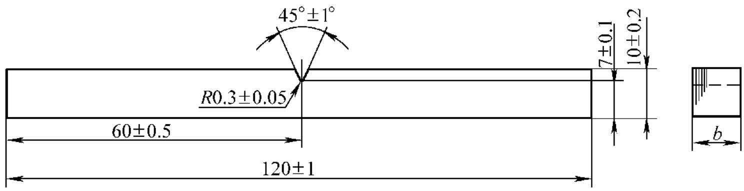



图 4-25　缺口方向与布层垂直的纤维织物试样

注：试样宽度 b 为板的厚度，取 6～10mm。仲裁试样的宽度为 10mm±2mm，当板厚大于 10mm 时，单面加工至 10mm±0. 2mm。

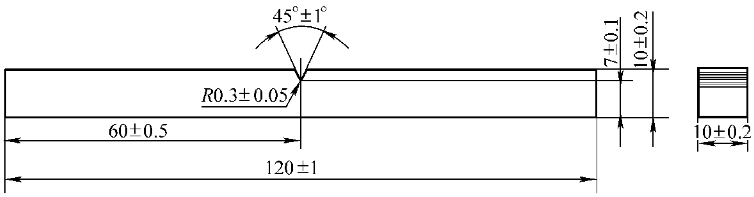



图 4-26　缺口方向与布层平行的纤维织物试样

注：当试样厚度大于 10mm 时，单面加工至 10mm±0. 2mm。缺口开在加工面上。

3）短切纤维增强塑料的试样如图 4-27 所示。

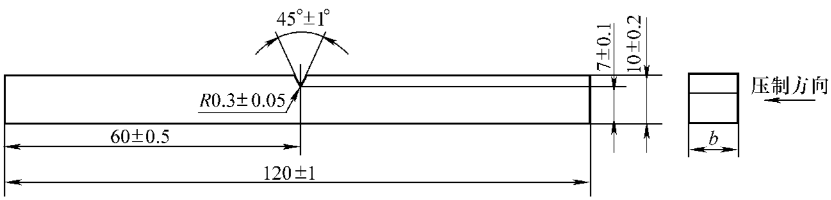



图 4-27　短切纤维增强塑料的试样

注：试样宽度 b 为板的厚度，取 6～10mm。仲裁试样的宽度为 10mm±2mm。缺口方向与压制方向相一致，缺口由加工而成。若缺口所在面与底面不平行，则加工缺口所在面使其与底面相互平行。

## 4. 11. 2　试验设备

试验机采用简支梁式非金属材料摆锤式冲击试验机。其摆锤和支座主要尺寸如图 4-28 所示。

## 4. 11. 3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

将开有 V 型缺口的试样两端水平放置在支撑物上，缺口背向冲击摆锤，摆锤向试

样中间撞击一次，使试样受冲击时产生应力集中而迅速破坏。

**2. 试验步骤**

1）选择合适能量的摆锤，使冲断试样所消耗的能量落在满量程的 10% ~ 85% 范围内。

2）用标准跨距样板调节支座的跨距，使其为 70mm ± 0. 5mm。

3）根据试验机打击中心的位置及试样的尺寸，决定是否在支座上加垫片。垫片的尺寸应根据试验机的情况而定。

4）试验前，须经一次空载冲击，调整试验机读数盘的指针使其指到零点。

5）将试样带缺口的一面背向摆锤。用试样定位板来安放试样，使缺口中心对准打击中心。

6）进行冲击，记录冲断试样所消耗的能量及破坏形式。

7）有明显内部缺陷或不在缺口处破坏的试样，应予作废。同批有效试样数量应符合规定，否则应重作试验。

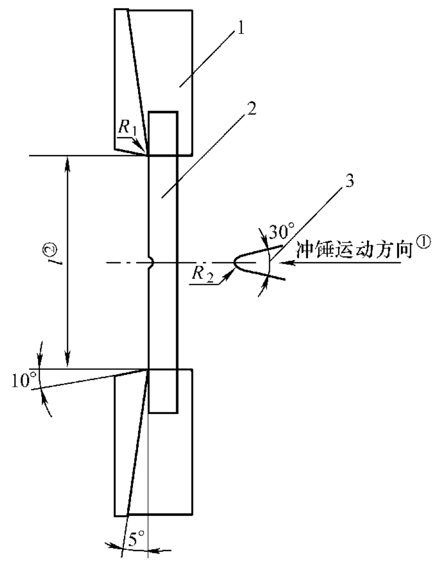



图 4-28　试验机主要尺寸

1—支座　2—试样　3—冲锤

① 冲击速度 3. 8m/s。

② 跨距 $l$ 为 70mm。

**3. 计算**

冲击强度按下式计算：

$$a_{\mathrm{k}} = \frac{A}{bt} \times 10^3$$

式中　$a_{\mathrm{k}}$——冲击强度，单位为 kJ/m²；

$A$——冲断试样所消耗的能量，单位为 J；

$b$——试样缺口处的宽度，单位为 mm；

$t$——试样缺口处的最小厚度，单位为 mm。

## 4. 12　流体输送用热塑性塑料管材简支梁冲击试验

流体输送用热塑性塑料管材简支梁冲击试验按照 GB/T 18743—2002《流体输送用热塑性塑料管材　简支梁冲击试验方法》进行。

### 4. 12. 1　试样

**1. 材料**

流体输送用热塑性塑料管材简支梁冲击试验适用于均聚和共聚聚丙烯（PP-H、PP-

B、PP-R）管材，未增塑聚氯乙烯（PVC-U）管材，经改性后高抗冲的聚氯乙烯（PVC-Hi）管材，氯化聚氯乙烯（PVC-C）管材，丙烯腈-丁二烯-苯乙烯和丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸（ABS、ASA）管材。

**2. 制备**

从管材上切割下试样。对于均聚和共聚聚丙烯管材，如果所切试样的壁厚 $e$ 小于等于 10.5mm，保留试样厚度，试样无需加工；如果壁厚 $e$ 大于 10.5 mm，则从外表面起加工至试样成薄片状，其厚度为 10mm ± 0.5mm，加工过的表面用细砂纸（颗粒≥220 目）沿长度方向磨光。

试样表面应平整、光滑，无毛刺。

**3. 切割和尺寸**

1）外径小于 25mm 的管材，其试样为 100mm ± 2mm 长的整个管段。

2）外径大于等于 25mm 小于 75mm 的管材，试样沿纵向切割，其尺寸和形状符合表 4-16 的要求。

**表 4-16　试样尺寸和支座间距**　（单位：mm）

| 试样类型 | 试样尺寸 | | | 支座间距 |
|---|---|---|---|---|
| | 长度 | 宽度 | 厚度 | |
| 1 | 100 ± 2 | 整个管段 | | 70 ± 0.5 |
| 2 | 50 ± 1 | 6 ± 0.2 | $e$ | 40 ± 0.5 |
| 3 | 120 ± 2 | 15 ± 0.5 | $e$ | 70 ± 0.5 |

注：$e$ 为管材的加工厚度。

3）外径大于等于 75mm 的管材，试样分别沿环向和纵向切割，其尺寸和形状符合表 4-16 的要求。

**4. 预处理**

将试样放在符合规定测试温度 $T_c$ 的水浴或空气浴中进行预处理。预处理时间见表 4-17。在仲裁检验时，应使用水浴。

**表 4-17　预处理时间**

| 试样厚度 $e$/mm | 预处理时间/min | |
|---|---|---|
| | 水浴 | 空气浴 |
| $e \leqslant 8.6$ | 15 | 60 |
| $8.6 < e \leqslant 14.1$ | 30 | 120 |
| $e > 14.1$ | 60 | 240 |

## 4.12.2　试验设备

**1. 冲击测试仪**

按 GB/T 1043 规定并符合下列要求：

1）冲击速度为 3.8m/s。

2）摆锤应能提供 15J 或 50J 的冲击能量，冲击刀刃夹角为 30° ± 1°，端部圆弧半径为 2mm ± 0.5mm。

3）纵向切割的试样的支撑方式如图 4-29 和图 4-30 所示。

4）环向切割的试样的支撑方式如图 4-31 所示。

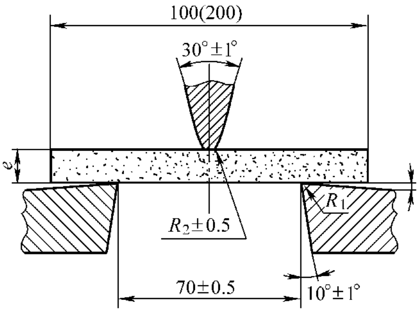



图 4-29　标准试样的冲击刀刃和支座

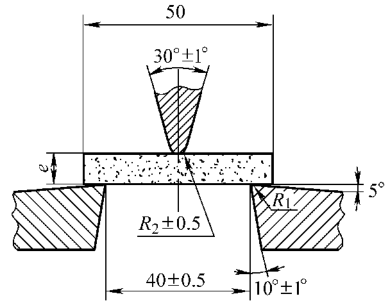



图 4-30　小试样的冲击刀刃和支座

**2. 试样预处理设备**

一个恒温控制的空间或浴槽，能够使试样达到规定的测试温度 $T_c$。

## 4.12.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

一小段管材或机械加工制得的无缺口条状试样在规定的测试温度 $T_c$ 下进行预处理，然后以规定的跨度将试样在水平方向呈简支梁式支撑，用具有给定冲击能量的摆锤在支撑中线处迅速冲击一次。

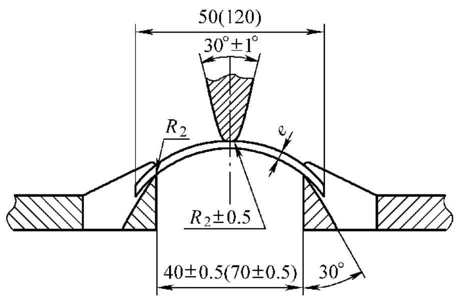



图 4-31　弧形试样的冲击刀刃和支座

注：弧形弦高的冲击动能忽略不计。

对规定数目的试样冲击后，以试样破坏数对被测试样总数的百分比表示试验结果。

**2. 试验条件**

1）均聚聚丙烯和共聚聚丙烯管材的试验条件如表 4-18 所示。

**表 4-18　均聚聚丙烯和共聚聚丙烯管材试验条件**

| 管材尺寸 | | 试样类型 | 试样的支撑方式 | 冲击能量/J | 测试温度 $T_c$/℃ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 外径 $d$/mm | 壁厚 $e$/mm | | | | 均聚物 | 共聚物 |
| $d<25$ | 全部 | 1 | 图 4-29 | 15 | 23 ±2 | 0 ±2 |
| $25\leqslant d<75$ | $e\leqslant4.2$ | 2 | 图 4-30 | 15 | 23 ±2 | 0 ±2 |
| $25\leqslant d<75$ | $4.2<e\leqslant10.5$ | 3 | 图 4-29 | 15 | 23 ±2 | 0 ±2 |
| $d\geqslant75$ | $e\leqslant4.2$ | 2 | 图 4-30 或图 4-31 | 15 | 23 ±2 | 0 ±2 |
| $d\geqslant75$ | $4.2<e\leqslant10.5$ | 3 | 图 4-29 或图 4-31 | 15 | 23 ±2 | 0 ±2 |

2）未增塑聚氯乙烯和高抗冲聚氯乙烯管材试验条件如表 4-19 所示。

3）氯化聚氯乙烯管材的试验条件如表 4-20 所示。

4）丙烯腈-丁二烯-苯乙烯和丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸管材的试验条件如表 4-21 所示。

表 4-19　未增塑聚氯乙烯和高抗冲聚氯乙烯管材试验条件

| 管材尺寸 | | 试样类型 | 试样的支撑方式 | 冲击能量/J | 测试温度 $T_c$/℃ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 外径 $d$/mm | 壁厚 $e$/mm | | | | PVC-U | PVC-Hi |
| $d<25$ | 全部 | 1 | 图 4-29 | 15 | 23 ± 2 | 0 ± 2 |
| $25\leqslant d<75$ | 全部 | 2 | 图 4-30 | 15 | 23 ± 2 | 0 ± 2 |
| $d\geqslant75$ | $e\leqslant9.5$ | 2 | 图 4-31 | 15 | 23 ± 2 | 0 ± 2 |
| $d\geqslant75$ | $e>9.5$ | 3 | 图 4-31 | 50 | 23 ± 2 | 0 ± 2 |

表 4-20　氯化聚氯乙烯管材的试验条件

| 管材尺寸 | | 试样类型 | 试样的支撑方式 | 冲击能量/J | 测试温度 $T_c$/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| 外径 $d$/mm | 壁厚 $e$/mm | | | | |
| $d<25$ | 全部 | 1 | 图 4-29 | 15 | 23 ± 2 |
| $25\leqslant d<75$ | $e\leqslant4.2$ | 2 | 图 4-30 | 15 | 23 ± 2 |
| $25\leqslant d<75$ | $4.2<e\leqslant9.5$ | 3 | 图 4-29 | 15 | 23 ± 2 |
| $d\geqslant75$ | $e\leqslant9.5$ | 2 | 图 4-31 | 15 | 23 ± 2 |
| $d\geqslant75$ | $e>9.5$ | 3 | 图 4-31 | 15 | 23 ± 2 |

表 4-21　丙烯腈-丁二烯-苯乙烯和丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸管材的试验条件

| 管材尺寸 | | 试样类型 | 试样的支撑方式 | 冲击能量/J | 测试温度 $T_c$/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| 外径 $d$/mm | 壁厚 $e$/mm | | | | |
| $d<75$ | $e<3$ | 2 | 图 4-30 | 15 | 23 ± 2 |
| $d<75$ | $e\geqslant3$ | 3 | 图 4-29 | 15 | 23 ± 2 |
| $d\geqslant75$ | $e<3$ | 2 | 图 4-31 | 15 | 23 ± 2 |
| $d\geqslant75$ | $e\geqslant3$ | 3 | 图 4-31 | 15 | 23 ± 2 |

**3. 试验步骤**

1）将已测量尺寸的试样从预处理的环境中取出，置于相应的支座上，按规定的方式支撑，在规定时间内（时间取决于 $T_c$ 和环境温度 $T$ 之间的温差），用规定能量对试样外表面进行冲击。

若温差小于或等于 5℃，试样从预处理环境中取出后，应在 60s 内完成冲击；若温差大于 5℃，试样从预处理环境中取出后，应在 10s 内完成冲击。

2）若超过上述规定的时间，但超过的时间不大于 60s，则可立即在预处理温度下对试样进行再处理至少 5min，并重新测试，否则应放弃该试样。

3）冲击后检查试样破坏情况，记下断裂或龟裂情况。如有需要可记录相关标准中规定的其他破坏现象。

4）重复试验步骤，直到完成规定数目的试样。

**4. 结果表示**

以试样破坏数对被测试样总数的百分比来表示试验结果。

# 4.13　热塑性塑料管冲击试验

热塑性塑料管冲击试验按照 GB/T 14152—2001《热塑性塑料管材耐性外冲击性能　试验方法　时针旋转法》进行。

## 4.13.1　试样

（1）试样制备　试样应从一批或连续生产的管材中随机抽取切割而成，其切割端面应与管材的轴线垂直，切割端应清洁、无损伤。

（2）试样长度　试样长度为 200mm ± 10mm。

（3）试样标线　外径大于 40mm 的试样应沿其长度方向画出等距离标线，并顺序编号。不同外径的管材试样画线的数量如表 4-22 所示。对于外径小于或等于 40 mm 的管材，每个试样只进行一次冲击。

**表 4-22　不同外径管材试样应画线数**

| 公称外径/mm | 应画线数 | 公称外径/mm | 应画线数 |
|---|---|---|---|
| ≤40 | — | 160 | 8 |
| 50 | 3 | 180 | 8 |
| 63 | 3 | 200 | 12 |
| 75 | 4 | 225 | 12 |
| 90 | 4 | 250 | 12 |
| 110 | 6 | 280 | 16 |
| 125 | 6 | ≥315 | 16 |
| 140 | 8 | — | — |

## 4.13.2　试验设备

试验设备采用落锤冲击试验机，其组成部分包括：

1）主机架和导轨：垂直固定，可以调节并垂直、自由释放落锤。校准时，落锤冲击管材的速度不能小于理论速度的 95%。

2）落锤：落锤应符合图 4-32、表 4-23 和表 4-24 的规定，锤头材质为钢，最小壁厚为 5mm，锤头的表面不应有凹痕、划伤等影响测试结果的可见缺陷。质量为 0.5kg 和 0.8kg 的落锤应具有 d25 型的锤头，质量大于或等于 1kg 的落锤应具有 d90 型的锤头。

3）试样支架：包括一个 120°角的 V 形托板，其长度不应小于 200mm，其固定位置应使落锤冲击点的垂直投影在距 V 形托板中心线的 2.5mm 以内。仲裁检验时，采用丝杠上顶式支架。

4）释放装置：可使落锤从至少 2m 高的任何高度落下，此高度指距离试样表面的高度，精确到 ± 10 mm。

5）应具有防止落锤二次冲击的装置：落锤回跳捕捉率应保证 100%。

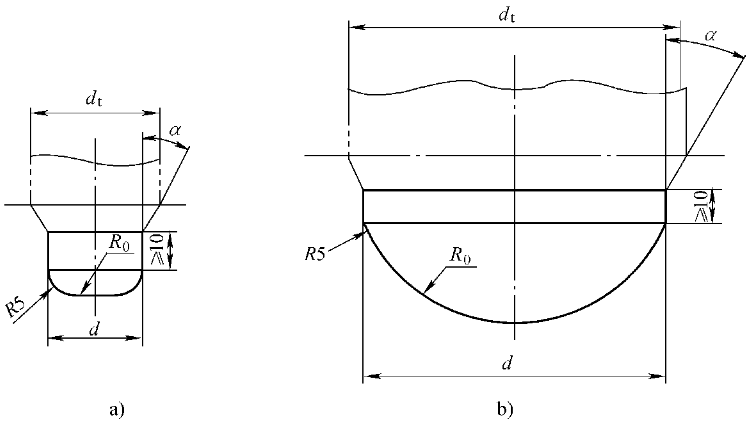



图 4-32　落锤的锤头

a）d25 型（质量为 0.5 kg 和 0.8kg 的落锤）　b）d90 型（质量大于或等于 1kg 的落锤）

**表 4-23　落锤的锤头的尺寸**　（单位：mm）

| 型　号 | $R_0$ | $d \pm 1$ | $d_t$ | $\alpha$/(°) |
|---|---|---|---|---|
| d25 | 50 | 25 | 任意 | 任意 |
| d90 | 50 | 90 | 任意 | 任意 |

**表 4-24　落锤的锤头的质量**　（单位：kg）

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 1.6 | 4.0 | 10.0 |
| 0.8 | 2.0 | 5.0 | 12.5 |
| 1.0 | 2.5 | 6.3 | 16.0 |
| 1.25 | 3.2 | 8.0 | — |

注：落锤质量的允许偏差为 ±0.5%。

## 4.13.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

以规定质量和尺寸的落锤从规定高度冲击试验样品规定的部位，即可测出该批（或连续挤出生产）产品的真实冲击率。

此试验方法可以通过改变落锤的质量和/或改变高度来满足不同产品的技术要求。

整批产品进行试验时，其冲击破坏总数除以冲击总数即为真实冲击率（TIR），以百分数表示，TIR 最大允许值为 10%。

**2. 试样状态调节**

1）试样应在 0℃ ±1℃或 20℃ ±2℃的水浴或空气浴中进行状态调节，最短调节时间如表 4-25 所示。仲裁检验时应使用水浴。

表 4-25 不同壁厚管材状态调节时间表

| 壁厚 $e$ /mm | 调节时间/min | |
|---|---|---|
| | 水 浴 | 空气浴 |
| $e \leqslant 8.6$ | 15 | 60 |
| $8.6 < e \leqslant 14.1$ | 30 | 120 |
| $e > 14.1$ | 60 | 240 |

2）状态调节后，壁厚小于或等于 8.6mm 的试样，应从空气浴中取出 10s 内或从水浴中取出 20s 内完成试验。壁厚大于 8.6mm 的试样，应从空气浴中取出 20s 内或从水浴中取出 30s 内完成试验。如果超过此时间间隔，应将试样立即放回预处理装置，最少进行 5min 的再处理。若试样状态调节温度为 20℃ ±2℃，试验环境温度为 20℃ ±5℃，则试样从取出至试验完毕的时间可放宽至 60s。

对于内外壁光滑的管材，应测量管材各部分壁厚，根据平均壁厚进行状态调节。对于波纹管或有加强筋的管材，根据管材截面最厚处壁厚进行状态调节。

**3. 试验步骤**

1）按照产品标准的规定确定落锤质量和冲击高度。

2）外径小于或等于 40mm 的试样，每个试样只承受一次冲击。

3）外径大于 40mm 的试样在进行冲击试验时，首先使落锤冲击在 1 号标线上，若试样未破坏，则按规定再对 2 号标线进行冲击，直至试样破坏或全部标线都冲击一次。

当波纹管或加筋管的波纹间距或筋间距超过管材外径的 0.25 倍时，要保证被冲击点为波纹或筋顶部。

4）逐个对试样进行冲击，直至取得判定结果。

**4. 结果判定**

1）若试样冲击破坏数在图 4-33 或表 4-26 的 A 区，则判定该批的 TIR 值小于或等于 10%。

2）若试样冲击破坏数在图 4-33 或表 4-26 的 C 区，则判定该批的 TIR 值大于 10%。

3）若试样冲击破坏数在图 4-33 或表 4-26 的 B 区，则应进一步取样试验，直至根据全部冲击试样的累计结果能够作出判定。

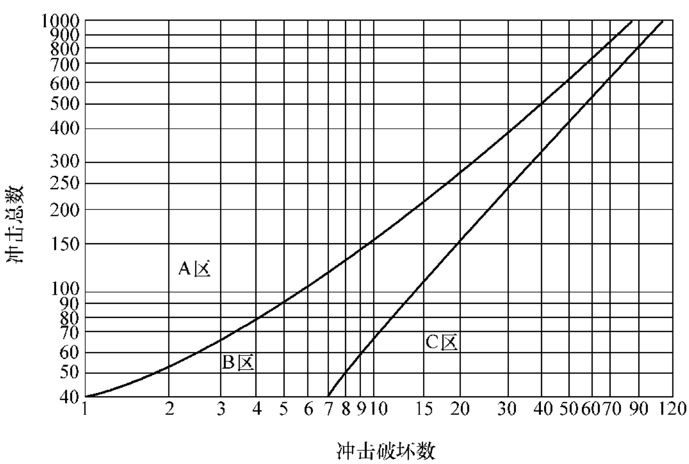



图 4-33 TIR 值为 10% 时判定图

表 4-26　TIR 值为 10%时判定表

| 冲击总数 | 冲击破坏数 | | | 冲击总数 | 冲击破坏数 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A 区 | B 区 | C 区 | | A 区 | B 区 | C 区 |
| 25 | 0 | 1 ~ 3 | 4 | 75 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 26 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 76 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 27 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 77 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 28 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 78 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 29 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 79 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 30 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 80 | 4 | 5 ~ 10 | 11 |
| 31 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 81 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 32 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 82 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 33 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 83 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 34 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 84 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 35 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 85 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 36 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 86 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 37 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 87 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 38 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 88 | 4 | 5 ~ 11 | 12 |
| 39 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 89 | 4 | 5 ~ 12 | 13 |
| 40 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 90 | 4 | 5 ~ 12 | 13 |
| 41 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 91 | 4 | 5 ~ 12 | 13 |
| 42 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 92 | 5 | 6 ~ 12 | 13 |
| 43 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 93 | 5 | 6 ~ 12 | 13 |
| 44 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 94 | 5 | 6 ~ 12 | 13 |
| 45 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 95 | 5 | 6 ~ 12 | 13 |
| 46 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 96 | 5 | 6 ~ 12 | 13 |
| 47 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 97 | 5 | 6 ~ 12 | 13 |
| 48 | 1 | 2 ~ 6 | 7 | 98 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 49 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 99 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 50 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 100 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 51 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 101 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 52 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 102 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 53 | 2 | 3 ~ 7 | 8 | 103 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 54 | 2 | 3 ~ 7 | 8 | 104 | 5 | 6 ~ 13 | 14 |
| 55 | 2 | 3 ~ 7 | 8 | 105 | 6 | 7 ~ 13 | 14 |
| 56 | 2 | 3 ~ 7 | 8 | 106 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 57 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 107 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 58 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 108 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 59 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 109 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 60 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 110 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 61 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 111 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 62 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 112 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 63 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 113 | 6 | 7 ~ 14 | 15 |
| 64 | 2 | 3 ~ 8 | 9 | 114 | 6 | 7 ~ 15 | 16 |
| 65 | 2 | 3 ~ 9 | 10 | 115 | 6 | 7 ~ 15 | 16 |
| 66 | 2 | 3 ~ 9 | 10 | 116 | 6 | 7 ~ 15 | 16 |
| 67 | 3 | 4 ~ 9 | 10 | 117 | 7 | 8 ~ 15 | 16 |
| 68 | 3 | 4 ~ 9 | 10 | 118 | 7 | 8 ~ 15 | 16 |
| 69 | 3 | 4 ~ 9 | 10 | 119 | 7 | 8 ~ 15 | 16 |
| 70 | 3 | 4 ~ 9 | 10 | 120 | 7 | 8 ~ 15 | 16 |
| 71 | 3 | 4 ~ 9 | 10 | 121 | 7 | 8 ~ 15 | 16 |
| 72 | 3 | 4 ~ 9 | 10 | 122 | 7 | 8 ~ 15 | 16 |
| 73 | 3 | 4 ~ 10 | 11 | 123 | 7 | 8 ~ 16 | 17 |
| 74 | 3 | 4 ~ 10 | 11 | 124 | 7 | 8 ~ 16 | 17 |

**5. 硬聚氯乙烯（PVC-U）压力管材0℃耐外冲击性能的测定**

当管材按表4-27规定的条件下进行测试时，TIR值不应超过10%。

**表4-27　0℃冲击试验的高度和质量要求**

| 管材公称外径/mm | M级 | | | H级 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 落锤质量/kg | 冲击高度/m | 冲击能量/J | 落锤质量/kg | 冲击高度/m | 冲击能量/J |
| 20 | 0.5 | 0.4 | 2 | 0.5 | 0.4 | 2 |
| 25 | 0.5 | 0.5 | 2.5 | 0.5 | 0.5 | 2.5 |
| 32 | 0.5 | 0.6 | 3 | 0.5 | 0.6 | 3 |
| 40 | 0.5 | 0.8 | 4 | 0.5 | 0.8 | 4 |
| 50 | 0.5 | 1.0 | 5 | 0.5 | 1.0 | 5 |
| 63 | 0.8 | 1.0 | 8 | 0.8 | 1.0 | 8 |
| 75 | 0.8 | 1.0 | 8 | 0.8 | 1.2 | 10 |
| 90 | 0.8 | 1.2 | 10 | 1.0 | 2.0 | 20 |
| 110 | 1.0 | 1.6 | 16 | 1.6 | 2.0 | 32 |
| 125 | 1.25 | 2.0 | 25 | 2.5 | 2.0 | 50 |
| 140 | 1.6 | 1.8 | 29 | 3.2 | 1.8 | 58 |
| 160 | 1.6 | 2.0 | 32 | 3.2 | 2.0 | 64 |
| 180 | 2.0 | 1.8 | 36 | 4.0 | 1.8 | 72 |
| 200 | 2.0 | 2.0 | 40 | 4.0 | 2.0 | 80 |
| 225 | 2.5 | 1.8 | 45 | 5.0 | 1.8 | 90 |
| 250 | 2.5 | 2.0 | 50 | 5.0 | 2.0 | 100 |
| 280 | 3.2 | 1.8 | 58 | 6.3 | 1.8 | 113 |
| 315 | 3.2 | 2.0 | 64 | 6.3 | 2.0 | 126 |
| 355 | 3.2 | 2.0 | 64 | 6.3 | 2.0 | 126 |
| 400 | 3.2 | 2.0 | 64 | 6.3 | 2.0 | 126 |
| 450 | 3.2 | 2.0 | 64 | 6.3 | 2.0 | 126 |

**6. 5%TIR值时的判定**

当产品要求TIR值为5%时，采用图4-34和表4-28进行结果判定。

1）若试样冲击破坏数在图4-34和表4-28的A区，则判定该批的TIR值小于或等于5%。

2）若试样冲击破坏数在图4-34和表4-28的C区，则判定该批的TIR值大于5%。

3）若试样冲击破坏数在图4-34和表4-28的B区，则应进一步取样试验，直至根据全部冲击试样的累计结果能够作出判定。

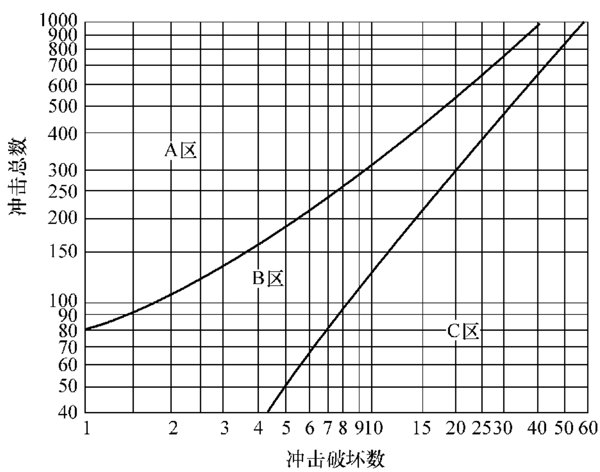



图4-34　TIR值为5%时判定图

**表 4-28　TIR 值为 5%时判定表**

| 冲击总数 | 冲击破坏数 | | | 冲击总数 | 冲击破坏数 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A 区 | B 区 | C 区 | | A 区 | B 区 | C 区 |
| 50 | 0 | 1 ~ 4 | 5 | 103 | 1 | 2 ~ 8 | 9 |
| 51 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 104 | 1 | 2 ~ 8 | 9 |
| 52 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 105 | 1 | 2 ~ 8 | 9 |
| 53 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 106 | 1 | 2 ~ 8 | 9 |
| 54 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 107 | 1 | 2 ~ 8 | 9 |
| 55 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 108 | 2 | 3 ~ 8 | 9 |
| 56 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 109 | 2 | 3 ~ 8 | 9 |
| 57 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 110 | 2 | 3 ~ 8 | 9 |
| 58 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 111 | 2 | 3 ~ 8 | 9 |
| 59 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 112 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 60 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 113 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 61 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 114 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 62 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 115 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 63 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 116 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 64 | 0 | 1 ~ 5 | 6 | 117 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 65 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 118 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 66 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 119 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 67 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 120 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 68 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 121 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 69 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 122 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 70 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 123 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 71 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 124 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 72 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 125 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 73 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 126 | 2 | 3 ~ 9 | 10 |
| 74 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 127 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 75 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 128 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 76 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 129 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 77 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 130 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 78 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 131 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 79 | 0 | 1 ~ 6 | 7 | 132 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 80 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 133 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 81 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 134 | 2 | 3 ~ 10 | 11 |
| 82 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 135 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 83 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 136 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 84 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 137 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 85 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 138 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 86 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 139 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 87 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 140 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 88 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 141 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 89 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 141 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 90 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 142 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 91 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 143 | 3 | 4 ~ 10 | 11 |
| 92 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 144 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 93 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 145 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 94 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 146 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 95 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 147 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 95 | 1 | 2 ~ 7 | 8 | 148 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 96 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | 149 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 97 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | 150 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 98 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | 151 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 99 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | 152 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 100 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | 153 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 101 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | 154 | 3 | 4 ~ 11 | 12 |
| 102 | 1 | 2 ~ 8 | 9 | | | | |

# 4.14　硬质橡胶冲击试验

硬质橡胶冲击试验按照 HG/T 3845—2008《硬质橡胶　冲击强度的测定》进行。

## 4.14.1　试样

1）试样形状和尺寸：试样为长方体，长度为 120mm，宽度为 15.0mm ±0.2mm，厚度为 10.0mm ±0.2mm。同一试样宽度变化不应大于 0.1mm，厚度变化不应大于 0.05mm。

2）试样的表面除两端面外，应进行机械加工，加工面必须平滑光洁，不应有裂纹或其他缺陷。

3）试样工作部分的长度（试验机两支点间的距离）应为 70mm。

4）试样数量为 5 个。

## 4.14.2　试验设备

**1. 基本要求**

试验应在试样可以自由地安置于两支座上的摆锤式冲击机上进行。

**2. 摆锤式冲击试验机应满足的条件**

1）A 型试验机（见图 4-35），摆锤锤头倾斜角为 30° ±10°，曲率半径为 2.0mm ±0.5 mm，支架倾角水平方向为 5° ±1°，垂直方向为 10° ±1°，支点曲率半径为 2.0mm ±0.5mm；B 型试验机（见图 4-36），摆锤锤头倾斜角为 45° ±1°，曲率半径为 3.0mm ±0.5 mm，支架倾角为 15° ±1°，支点曲率半径为 3.0 mm ±0.5 mm。两种试验机的试验结果不可比较。

2）为保证试样可以在摆锤最小势能下被折断，试样中心对摆锤锤头的安装误差应不大于 0.5 mm。

3）冲击时，摆锤的锤头应与试样的整个宽度相接触。接触线应与试样纵轴垂直，误差不大于 1.8°。

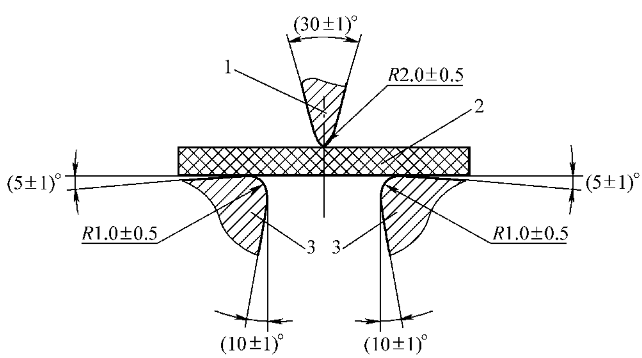



图 4-35　A 型试验机

1—摆锤　2—试样　3—支点

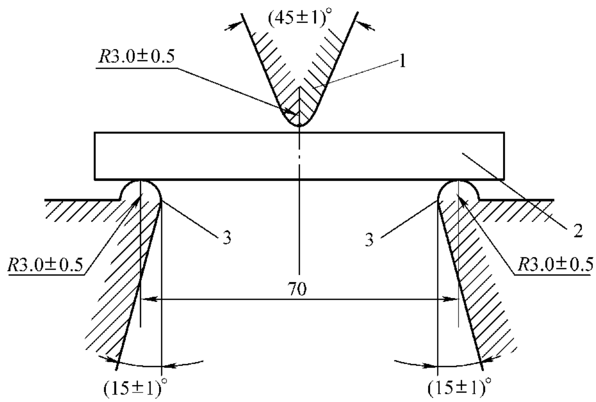



图 4-36　B 型试验机

1—摆锤　2—试样　3—支点

4）试验机须有各种不同冲击能量的摆锤，用以试验各种不同材质的试样。各种摆锤的冲击能、速度及最大摩擦损失如表 4-29 所示。

**表 4-29　摆锤参数表**

| 摆锤的冲击能/J | 最大摩擦损失(%) | 摆锤冲击速度/(m/s) |
|---|---|---|
| 0.5 | 2.0 | 2.9 ±0.29 |
| 1.0、2.0、2.5 | 1.0 | |
| 4.0、5.0 | 0.5 | |
| 7.5、15.0、25.0、50.0 | 0.5 | 3.8 ±0.38 |

5）在选择摆锤时，其冲击能使试样破坏时，能量消耗应在 10% ~80% 之间。在几种摆锤进行选择时，应选用能量大的。不同冲击能量的摆锤，测得结果不能相比。

6）试验机的刻度盘是按冲击能分度。

## 4.14.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）测量试样中部受负荷作用部分的宽度和厚度，精确到 0.02mm。

2）使试验机的摆锤扬起，同时空击试验，放下摆锤冲击三次，观察指针是否指示为零。

3）调整零点后扬起摆锤，将试样紧密地横放在试验机的支点上，并释放摆锤，使其冲击试样的宽面。

4）摆锤冲击后回摆时，使摆锤停止摆动，并立即记下刻度盘上的指示值。

5）试样被击断后，观察其断面，如有缺陷该试样数据作废，应重新取样测定。

6）每个试样只能受一次冲击，如果试样未断，可更换试样再用较大能量的摆锤重新进行试验。如果达到试验机的最大冲击能量时仍未击断，则按最大冲击能量计算。

**2. 试验结果的表示**

冲击强度（使试样受具有一定位能的摆锤冲击而折断，测定试样折断时所消耗的

能量，计算出冲击破坏时的强度）按下式计算：

$$\gamma = \frac{A}{bdL}$$

式中　$\gamma$——试样冲击强度，单位为 $J/m^3$；

$A$——试样破坏消耗的能量，单位为 J；

$b$——试样的宽度，单位为 m；

$d$——试样的厚度，单位为 m；

$L$——支点间的距离，单位为 m。

**3. 试验结果的数值修约**

试验结果取中位数，按 GB/T 8170 进行修约，保留 3 位有效数字，有效试样不少于 3 个。

## 4.15　不透性石墨材料冲击试验

不透性石墨材料冲击试验按照 GB/T 13465.4—2002《不透性石墨材料冲击试验方法》进行。

### 4.15.1　试样

**1. 取样**

1）以相同原料、配方及生产工艺生产的同一规格不多于 30t 的石墨块作为一批，随机抽样，抽样数量不少于 3 块。

2）外购材料以同一时间、从同一生产厂家购进的同一规格材料为一批，随机抽样，抽样数量不少于 3 块。

3）最小截面尺寸不大于 200mm × 200mm 的材料，在端部截去 50mm，其余部分均可加工试样。

4）最小截面尺寸大于 200mm × 200mm 的材料，在各表层刨去 50mm，其余部分均可加工试样。

5）直径不大于 350mm 的材料，在端部截去 50mm，然后在中心直径为 100mm 的圆柱体内取材加工试样。

6）直径大于 350mm 的材料，在端部截去 50mm，然后在中心直径为 200mm 的圆柱体内取材加工试样。

**2. 试样加工**

1）每组试样须分别从所抽石墨材料中制取。

2）浇注试样应进行热固化处理，热处理温度按产品要求确定。

3）试样加工时，除有特殊要求外，应使拉伸、压缩试样试验时的受力方向与材料的成型压力方向平行，使弯曲、冲击试样试验时的受力方向与材料的成型压力方向垂直。

4）先对所取石墨材料进行粗加工，然后按生产工艺进行浸渍，加工成试样。

5）加工后试样表面粗糙度须达 $Ra \leqslant 3.2\mu m$。

6）粘结剂试样成型后不需再加工。

7）试样表面应无气泡、裂纹、砂眼、树脂瘤等明显缺陷。

**3. 试样的尺寸**

标准试件带有 V 型缺口，试样尺寸如图 4-37 所示。

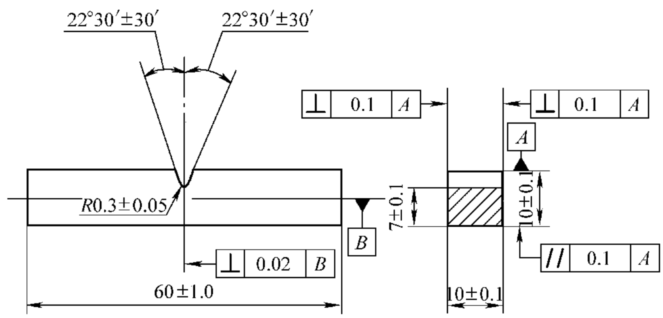



图 4-37　标准试样

在必要情况下，允许采用带钥匙孔型缺口的辅助试样，如图 4-38 所示。

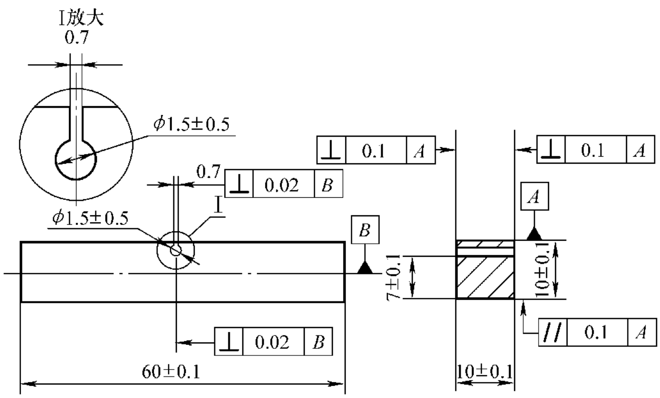



图 4-38　辅助试样

## 4.15.2　试验设备

**1. 压力表**

试验所用的压力表精度等级不低于 0.4 级。

**2. 游标卡尺**

游标卡尺的量程为 0～150mm，分度值为 0.02mm。

**3. 试验机**

1）试验机试样支座及摆锤刀刃尺寸应符合图 4-39 的要求。

2）试验机的结构应具有足够的刚性，应放在牢固的工作台上，试验机机座的水平公差为 0.0002mm。

3）试验机的标准打击能量为 0. 490J、0. 981J 和 3. 923J，试验机正常使用范围为每套摆锤最大打击能量的 10% ~90%。

4）试验机试样支座及摆锤刀刃开始接触试样的瞬时打击速度为 2. 9m/s。

5）试验机应符合 JJG 145 技术要求的规定。

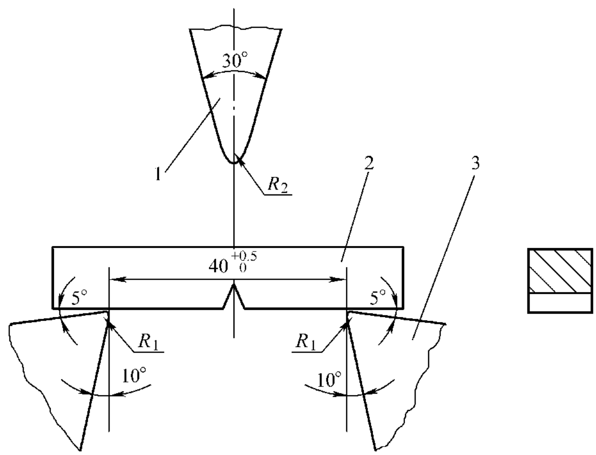



图 4-39　试样支座及摆锤刀刃尺寸

1—摆锤　2—试样　3—支座

## 4.15.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）尺寸测量：在试样缺口底部横截面的 4 处测宽度和高度各两次，取宽度和高度数据的算术平均值。

2）根据试样预期冲击消耗功选择试验机的量程。

3）用试验机跨距找正器调准简支梁跨距为 $40_{0}^{+0.5}$mm。

4）调整读数指针到零度处，试验机摆锤空打一次。检查试验机消耗功是否超差。

5）试样的放置应紧贴支座，使用试样找正器使摆锤刀刃正好能打击缺口中心背面。

6）试样经试验机摆锤冲击后读取试样断裂时表盘冲击功显示值。

**2. 结果计算**

1）冲击吸收能量由下式计算：

$$A_k = A - \Delta A$$

式中　$A_k$——试样冲击吸收能量，单位为 J；

$A$——试样断裂时冲击功示值，单位为 J；

$\Delta A$——冲击试验机消耗功，单位为 J（由试验机说明书查出）。

2）冲击强度由下式计算：

$$a_k = A_k/(bh)$$

式中　$a_k$——冲击强度，单位为 $J/cm^2$；

$b$——试样缺口处底部横截面宽度，单位为 cm；

$h$——试样缺口处底部横截面高度，单位为 cm；

$A_k$——试样冲击吸收能量，单位为 J。

## 4.16　人造金刚石冲击试验

人造金刚石冲击试验按照 JB/T 10987—2010《超硬磨料　人造金刚石冲击韧性测定方法》进行。

### 4.16.1　试样

1）待测试样粒度组成应符合 GB/T 6406 的规定。

2）按 GB/T 6406 规定进行筛分，取下检查筛筛上物（应全部通过上检查筛）作为待测试样，置于 110℃ ±5℃的烘箱中烘干 1h，取出，放入干燥器中冷却至室温备用。

### 4.16.2　试验设备

**1. 冲击韧性测定仪**

冲击韧性测定仪的组成部分包括：

1）振动装置：以恒定的方式振动试样管。

2）试样管：装人造金刚石试样用。

3）钢球：装在试样管里冲击试样。

**2. 振动装置**

振动装置如图 4-40 所示，应同时具备下列条件：

1）摇臂摆动半径应不小于 100mm。

2）试样管振动频率为 2400r/min ±3r/min。

3）试样管轴向振动振幅为 8mm ±0. 02mm。

4）冲击次数为 500 ~9999 次连续可调。

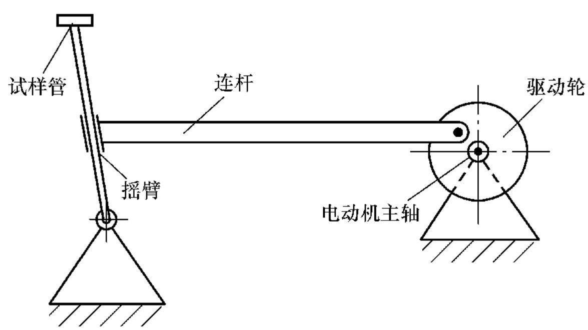



图 4-40　振动装置示意图

**3. 试样管**

试样管材质为 GCr15，硬度为 60 ~ 62HRC，尺寸如图 4-41 所示。

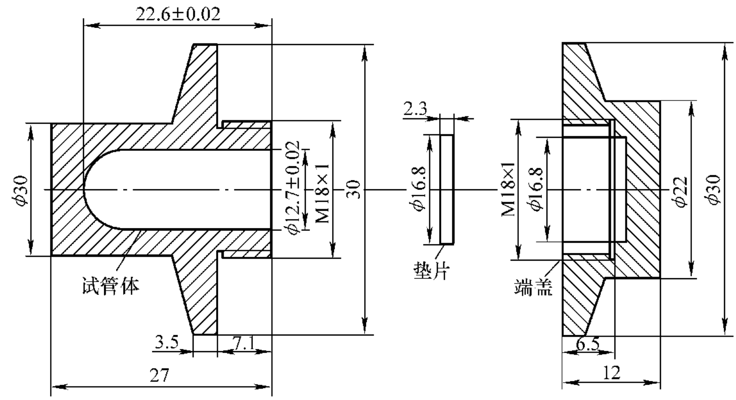



图 4-41　试样管

**4. 钢球**

钢球应符合 GB/T 308 的规定，直径为 8mm，质量为 2.08 ~ 2.09g，精度为 10 级，材质为 GCr15，硬度为 61 ~ 66HRC。

**5. 筛机和检查筛**

筛机和检查筛应符合 GB/T 6406 的规定。

**6. 天平**

天平分度值为 0.1mg。

**7. 人造金刚石标样**

人造金刚石标样为了校正试样冲击韧性测定结果而使用的标准试样。每一份人造金刚石标样皆附有其冲击韧性基准值。

## 4.16.3　试验内容及结果表示

**1. 测定前的准备工作**

1）接通电源，使冲击韧性测定仪预热 10min。

2）新试样管使用前，应使用粒度为 40/45 目的人造金刚石，按表 4-30 规定的冲击次数连续冲击 5 次后才可使用。试样管每次使用均应记录次数，使用前应检查其使用次数，使用次数不得超过 100 次。

3）钢球使用前，应使用酒精擦洗晾干后。将其和粒度为 40/45 目的 0.5g 人造金刚石一起装入试样管内，按表 4-30 规定的冲击次数进行冲击，取出后用酒精擦洗晾干后才可使用。一次使用一个钢球，每个钢球使用一次。

**表 4-30　各粒度号人造金刚石冲击次数**

| 粒度/目 | 冲击次数 | 粒度/目 | 冲击次数 |
|---|---|---|---|
| 35/40 及以粗 | 1600 | 50/60 | 2800 |
| 40/45、40/50、45/50 | 2000 | 60/70 | 3600 |

（续）

| 粒度/目 | 冲 击 次 数 | 粒度/目 | 冲 击 次 数 |
|---|---|---|---|
| 60/80 | 3800 | 170/200 | 5200 |
| 70/80、80/100 | 4200 | 200/230 | 5400 |
| 100/120 | 4600 | 230/270 | 5600 |
| 120/140 | 4800 | 270/325 | 5800 |
| 140/170 | 5000 | 325/400 | 6000 |

**2. 冲击试样**

1）称量 3 份相同试样，精确至 0.1mg，每份质量应为 $0.4_{0}^{+0.0020}$g，分别进行冲击试验。

2）将试样连同钢球一起装入试样管内，盖好端盖，牢固地装入试样支架上，根据试样粒度按表 4-30 规定选择冲击次数，起动仪器冲击试样。

**3. 筛分**

选用较原试样粒度号细一号的下检查筛，将冲击后的试样筛分 3min。

**4. 试样冲击韧性测定值的计算**

称量筛上物，按下式计算试样冲击韧性值，精确到小数点后一位。取 3 份试样冲击韧性值的算术平均值作为试样的冲击韧性测定值。

$$TI = \frac{m_1}{m} \times 100\%$$

式中　$TI$——试样冲击韧性值（%）

$m_1$——冲击、筛分后筛上物质量，单位为 g；

$m$——冲击前试样质量，单位为 g。

# 第 5 章　材料扭转性能测定试验

## 5.1　金属材料室温扭转试验

金属材料室温扭转试验按照 GB/T 10128—2007《金属材料　室温扭转试验方法》进行。

### 5.1.1　试样

**1. 试样形状和尺寸**

（1）圆柱形试样　圆柱形试样如图 5-1 所示。试样头部形状和尺寸应适应试验机夹头夹持，一般采用直径为 10mm、标距分别为 50mm 和 100mm、平行长度分别为 70mm 和 120mm 的试样，如采用其他直径的试样，其平行长度应为标距加上两倍直径。

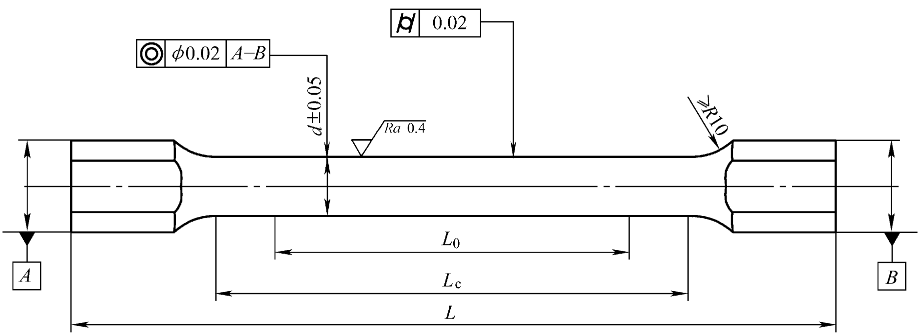



图 5-1　圆柱形试样

$L_0$—试样标距（mm）　$L_c$—试样平行长度（mm）　$L$—试样总长度（mm）

（2）管形试样　管形试样的平行长度应为标距加上两倍外直径，其外直径和管壁厚度的尺寸公差及内外表面粗糙度应符合相关规定。试样应平直，两端应配合塞头，塞头不应伸进其平行长度内。管形试样塞头如图 5-2 所示。

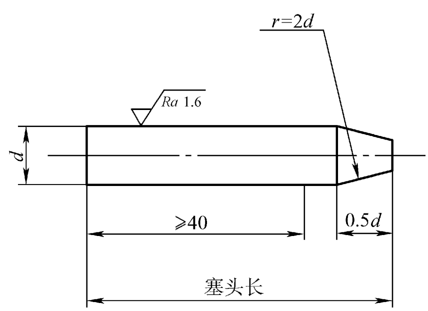



图 5-2　管形试样塞头

$d$—塞头直径（mm）

**2. 试样尺寸的测量**

（1）圆柱形试样　圆柱形试样应在标距两端及中间处两个相互垂直的方向上各测一次直径，并取其算术平均值。取用 3 处测得直径的算术平均值计算试样的极惯性矩，取用 3 处测得直径的算术平均值中最小值计算试样的截面

系数。

（2）管形试样　管形试样应在其一端两个相互垂直的方向上各测一次外径，取其算术平均值。在同一端两个相互垂直的方向上测量 4 外管壁厚度，取其算术平均值。取用测得的平均外直径和平均管壁厚度计算管形试样的极惯性矩和截面系数。

（3）测量装置的分辨力　测量装置的分辨力如表 5-1 所示。

**表 5-1　测量装置的分辨力**　（单位：mm）

| 试样尺寸 | | 测量装置分辨力 |
|---|---|---|
| 直　　径 | | 0.01 |
| 壁　　厚 | <1 | 0.002 |
| | ≥1 | 0.01 |
| 标　　距 | | 0.05 |

## 5.1.2　试验设备

**1. 扭转试验机**

（1）试验机的要求　试验机的要求如下：

1）试验机两夹头之一应能沿轴向自由移动，对试样无附加轴向力，两夹头保持同轴。

2）试验机应能对试样连续施加扭矩，无冲击和振动。

3）试验机应具有良好的读数稳定性，在 30s 内保持扭矩恒定。

4）试验机夹头应有适合的硬度，不同硬度材质的试样应使用合适硬度的夹块进行试验。一般夹头的硬度高于试样硬度 20HRC 左右。

5）试验机的速度应能调节，并有自动记录扭转次数的装置及测量两夹头间标距长度的刻度尺。

（2）试验机的操作要点　试验机的操作要点如下：

1）里程选择。根据试样平行长度部分的横截面积和材料的抗扭强度，估计测试所需施加的最大扭矩，尽可能使其处于选定量程的 40% ~80% 范围内。

2）安装试样。根据试样的尺寸选择夹块和衬套，并塞放在试验机的两夹头中。先将试样插入固定夹头，再将主动夹头旋转到适当位置，移动溜板对准试样装入夹头，用内六角扳手拧紧夹头侧面的压紧螺钉，使夹块压紧试样。

3）检查绘图机构。检查记录笔是否有墨水，观察笔尖画线是否流畅。注意记录纸走动是否正常。调整记录筒的转速，以便获得合适的走纸速度。

4）调零计数。在施加扭矩之前，测扭矩度盘的主动指针应指在零位，同时调整附在主动夹头上的扭转角刻度环，使其零点与指针重合。

5）调整转速。扭转速度的选择应符合试验要求。一般脆性材料和塑性材料在屈服前均应以低速施加扭矩，塑性材料屈服后，可以提高扭转速度。

**2. 扭转计**

1）扭转计标距相对误差应不大于 ±0.5%，并能牢固地装夹在试样上，试验过程中不发生滑移。

2）扭角示值分辨力不大于0.001°。

3）扭角示值相对误差为 ±1.0%（在不大于0.5°范围时，示值误差不大于0.005°）。

4）扭角示值重复性不大于1.0%。

## 5.1.3　试验内容及结果表示

**1. 试验条件**

1）试验一般在10～35℃范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为23℃ ±5℃。

2）屈服前的扭转速度应在3～30°/min范围内，屈服后的扭转速度应不大于720°/min，速度的改变不能有冲击。

**2. 剪切模量的测定**

（1）图解法　图解法按下面步骤进行：

1）用自动记录方法记录扭矩-扭角（$T$-$\phi$）曲线。

2）在所记录曲线的弹性直线段上，读取扭矩增量和相应的扭角增量，如图5-3所示。

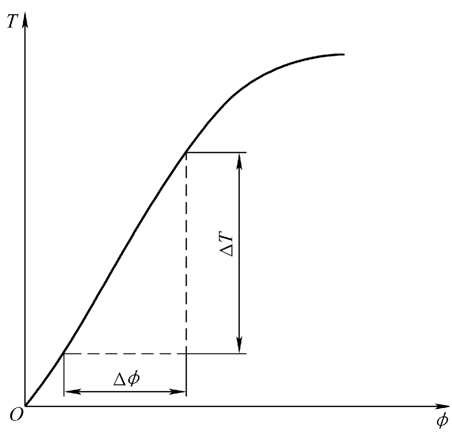



图5-3　剪切模量

3）按下式计算剪切模量：

$$G=\frac{\Delta T L_e}{\Delta\phi I_p}$$

式中　$G$——剪切模量，单位为MPa；

$\Delta T$——扭矩增量，单位为N·mm；

$L_e$——扭转计标距，单位为mm；

$\Delta\phi$——扭角增量，单位为（°）；

$I_p$——极惯性矩，单位为$mm^4$，对于圆柱形试样和管形试样分别按下式计算：

圆柱形试样　$$I_p=\frac{\pi d^4}{32}$$

式中　$d$——圆柱形试样平行长度部分的外直径，单位为mm。

管形试样　$$I_p=\frac{\pi d^3 a}{4}\left[1-\frac{3a}{d}+\frac{4a^2}{d^2}-\frac{2a^3}{d^3}\right]$$

式中　$d$——管形试样平行长度部分的外直径，单位为mm；

$a$——管形试样平行长度部分的管壁厚度，单位为mm。

（2）逐级加载法　逐级加载法按下面步骤进行：

1）对试样施加预扭矩，预扭矩一般不超过相应预期规定非比例扭转强度$\tau_{p0.015}$的10%。

2）装上扭转计并调整零点。

3）在弹性直线段范围内，用不少于 5 级等扭矩对试样加载。

4）记录每级扭矩和相应的扭角，读取每对数据对的时间不超过 10s。

5）计算出平均每级扭角增量。

6）按公式 $G=\dfrac{\Delta TL_e}{\Delta\phi I_p}$计算剪切模量。

**3. 规定非比例扭转强度的测定**

（1）图解法　图解法按下面步骤进行：

1）用自动记录方法记录扭矩-扭角（$T$-$\phi$）曲线，如图 5-4 所示。

2）在所记录的曲线上延长弹性直线段交扭角轴于 $O$ 点，截取 $OC=2L_e\gamma_p/d$，过点 $C$ 绘制弹性直线段的平行线 $CA$ 交曲线于 $A$，点 $A$ 对应的扭矩为所求扭矩 $T_p$。

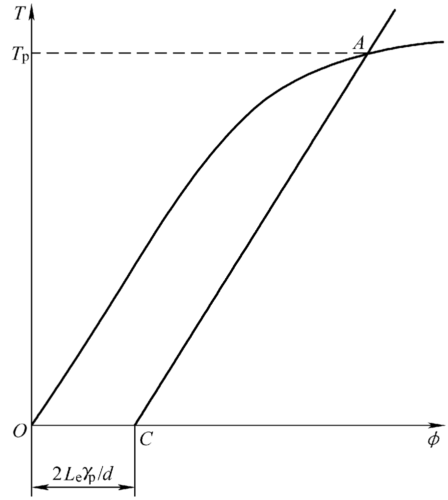



图 5-4　规定非比例扭转强度

3）按下式计算式计算规定非比例扭转强度：

$$\tau_p=\frac{T_p}{W}$$

式中　$\tau_p$——规定非比例扭转强度，单位为 MPa；

$T_p$——规定非比例扭矩，单位为 N · mm；

$W$——截面系数，单位为 $mm^3$，对于圆柱形试样和管形试样分别按下式计算：

圆柱形试样　$$W=\frac{\pi d^3}{16}$$

式中　$d$——圆柱形试样平行长度部分的外直径，单位为 mm。

管形试样　$$W=\frac{\pi d^2 a}{2}\left[1-\frac{3a}{d}+\frac{4a^2}{d^2}-\frac{2a^3}{d^3}\right]$$

式中　$d$——管形试样平行长度部分的外直径，单位为 mm；

$a$——管形试样平行长度部分的管壁厚度，单位为 mm。

（2）逐级加载法　逐级加载法按下面步骤进行：

1）对试样施加预扭矩，预扭矩一般不超过相应预期规定非比例扭转强度 $\tau_{p0.015}$ 的 10%。

2）装上扭转计并调整零点。

3）在相当于规定非比例扭转强度 $\tau_{p0.015}$ 的 70% ~80% 以前，施加大等级扭矩，以后施加小等级扭矩，小等级扭矩应相当于不大于 10MPa 的切应力增量。

4）读取各级扭矩读数中减去计算得到的弹性部分扭角，得到非比例部分扭角。

5）施加扭矩直至得到非比例扭角等于或稍大于所规定的数值为止。

6）用内插法求出精确的扭矩，按公式 $\tau_p=T_p/W$ 计算规定非比例扭转强度。

逐级加载法测定规定非比例扭转强度举例：

试验材料为碳素钢，试样直径 $d$ 为 10.00mm，扭转计标距 $L_e=100.0$mm，扭转计分度 0.00025rad，截面系数 $W=196.35\text{mm}^3$。

预期规定非比例扭转强度 $\tau_{p0.015}=250$MPa 取初始预应力 $\tau_0=10\%\tau_{p0.015}=25$ MPa，相当于预扭矩 $T_0=\tau_0 W=4908.75$N · mm，取整 $T_0=5000$N · mm。相当于预期规定非比例扭转强度的 80% 的扭矩为

$$T=80\%\tau_{p0.015}W=0.8\times250\times196.35\text{N}\cdot\text{mm}=39270\text{N}\cdot\text{mm}$$

取整 $T=39000$N · mm。

在预期规定非比例扭转强度的 80% 以前施加大等级扭矩，以后施加小等级扭矩。大等级扭矩取 3 级，每级为

$$\Delta T=\frac{T-T_0}{3}=\frac{39000-5000}{3}\text{N}\cdot\text{mm}=11333\text{N}\cdot\text{mm}$$

取整 $\Delta T=11000$N · mm。

小等级扭矩取 $\Delta T_1=2000$N · mm。

试验记录如表 5-2 所示。

**表 5-2　试验记录**

| 扭矩 $T$/N · mm | 扭转计读数/分度 | 读数增量/分度 | 计算的比例扭角读数/分度 | 计算的非比例扭角读数/分度 |
|---|---|---|---|---|
| 5000 | 0 | 0 | $\Delta A_{2000}=10.3$ | — |
| 16000 | 53 | 53 | | — |
| 27000 | 109 | 56 | | — |
| 38000 | 165 | 56 | | — |
| 40000 | 174 | 9 | | — |
| 42000 | 186 | 12 | | — |
| 44000 | 197 | 11 | | — |
| 46000 | 207 | 10 | | — |
| 48000 | 219 | 12 | | — |
| 50000 | 232 | 13 | | — |
| 52000 | 249 | 17 | 242.3 | 6.7 |
| 54000 | 270 | 21 | 252.6 | 17.4 |
| 56000 | 296 | 26 | 262.9 | 33.1 |

在线性比例范围内计算得的小等级扭矩的扭角平均增量为

$$\Delta A_{2000}=\frac{232-0}{50000-5000}\times2000\text{分度}=10.3\text{分度}$$

从总角读数中减去按每 2000N · mm 对应的比例扭角为 10.3 分度这样计算的比例扭角部分，即可得非比例扭角部分。

由于要测定的规定非比例扭转强度 $\tau_{p0.015}$，其规定的非比例切应变为 0.015%，所对应的扭转计分度数为

$$\left[\left(2\times0.015\%\times\frac{L_e}{d}\right)\Big/0.00025\right]\text{分度}=\left[\left(2\times\frac{0.015}{100}\times\frac{100.0}{10.00}\right)\Big/0.00025\right]\text{分度}=12.0\text{分度}$$

从表 5-2 中读出最接近非比例扭角为 12.0 分度时对应的扭矩为 52000N · mm，用内

插法求出精确的扭矩值为

$$T_{p0.015}=\frac{(17.4-12.0)\times52000+(12.0-6.7)\times54000}{17.4-6.7}\text{N}\cdot\text{mm}=52990.65\text{N}\cdot\text{mm}$$

$$\tau_{p0.015}=\frac{T_{p0.015}}{W}=\frac{52990.65}{196.35}\text{MPa}=269.879\text{MPa}$$

修约后为 $\tau_{p0.015}=270\text{MPa}$。

（3）上屈服强度和下屈服强度的确定　上屈服强度和下屈服强度的确定按下面步骤进行：

1）试验时用自动记录方法记录扭矩-扭角（$T$-$\phi$）曲线，首次下降前的最大扭矩为上屈服扭矩，屈服阶段中不计初始瞬时效应的最小扭矩为下屈服扭矩，如图5-5所示。

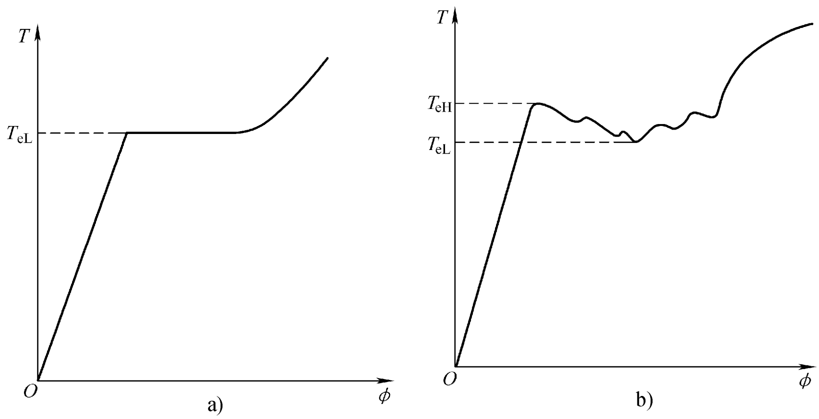



图5-5　上屈服扭矩和下屈服扭矩

a）下屈服扭矩　b）上、下屈服扭矩

2）按下式计算上屈服强度：

$$\tau_{eH}=\frac{T_{eH}}{W}$$

式中　$\tau_{eH}$——上屈服强度，单位为MPa；

$T_{eH}$——上屈服扭矩，单位为N·mm；

$W$——截面系数，单位为$mm^3$。

3）按下式计算下屈服强度：

$$\tau_{eL}=\frac{T_{eL}}{W}$$

式中　$\tau_{eL}$——下屈服强度，单位为MPa；

$T_{eL}$——下屈服扭矩，单位为N·mm；

$W$——截面系数，单位为$mm^3$。

（4）抗扭强度的测定　抗扭强度的测定按下面步骤进行：

1）对试样连续施加扭矩，直至扭断。从记录的扭转曲线或试验机扭矩盘上读出试样扭断前所承受的最大扭矩，如图5-6所示。

2）按下式计算抗扭强度：

$$\tau_m = \frac{T_m}{W}$$

式中　$\tau_m$——抗扭强度，单位为 MPa；

$T_m$——最大扭矩，单位为 N · mm；

$W$——截面系数，单位为 $mm^3$。

（5）最大非比例切应变的测定　最大非比例切应变的测定按下列步骤进行：

1）对试样连续施加扭矩，记录扭矩-扭角（$T$-$\phi$）曲线，直至扭断。

2）过断裂点 $K$ 绘制曲线弹性直线段的平行线 $KJ$ 交扭角轴于 $J$ 点，$OJ$ 即为最大非比例扭角，如图 5-6 所示。

3）按下式计算最大非比例切应变：

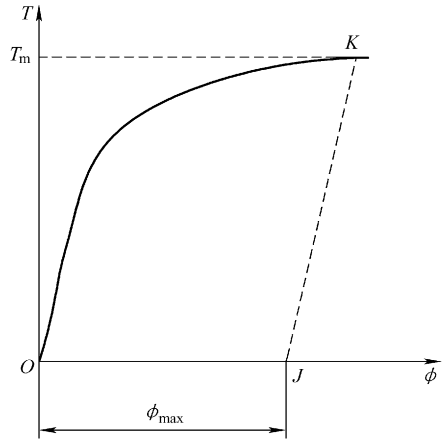



图 5-6　最大扭矩和最大非比例扭角

$T_m$—最大扭矩（N · mm）

$\phi_{max}$—最大非比例扭角（°）

$$\gamma_{max}(\%) = \left(\frac{\phi_{max} d}{2L_e}\right) \times 100\%$$

式中　$\gamma_{max}$——最大非比例扭角，单位为（°）；

$d$——圆柱形试样或管形试样平行长度部分的外直径，单位为 mm；

$L_e$——扭转计标距，单位为 mm。

## 5.2　金属大规格线材扭转试验

金属大规格线材扭转试验按照 YB/T 4176—2008《金属材料　大规格线材扭转试验方法》进行。

### 5.2.1　试样

所谓大规格线材，是指测定直径（或特征尺寸）大于 10mm 的金属线材。

1）试样应尽可能是平直的，试样头部夹持部位应平整，方便夹具的夹持。

2）可将试样置于木材、塑料或铜质平面上，用由这些材料制成的工具矫直。

3）矫直时不允许损伤试样表面，不应扭曲试样，也不允许对试样进行任何热加工处理。

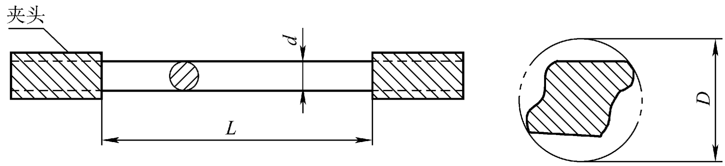
4）存在局部硬弯的线材不允许用于试验。

5）试样形状尺寸如图 5-7 所示。

6）试样间两夹头间的标距长度 $L$ 应为 $22d$ 或 $22D$。

### 5.2.2　试验设备

1）试验机夹头应有适合的硬度，不同硬度材质的试样应使用合适硬度的夹块进行试验。一般推荐夹头的硬度高于试样硬度 20HRC 左右。




a)　　b)

图 5-7　金属线材扭转试样

a）圆形横截面　b）非圆形横截面

*d*—圆形横截面金属线材直径（mm）　*D*—非圆形横截面金属线材特征尺寸（mm）

*L*—两夹头之间的标距长度（mm）

2）试验期间，两夹头应保持在同一轴线上，并对试样不施加任何弯曲力，不应妨碍由试样引起的夹头之间长度的变化。

3）试验机夹头的一端应能绕试样轴线双向旋转，而另一端不应有任何转动，但能沿轴向自由移动。

4）试验机的速度应能调节，并有自动记录扭转次数的装置及测量两夹头间标距长度的刻度尺。

## 5.2.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）试验一般应在 10 ~ 35℃下进行，如有特殊要求，试验温度应为 23℃ ±5℃。

2）将试样置于试验机夹持钳口中，使其轴线与夹头轴线相重合。

3）除另有规定外，可按 2 ~ 6r/min 的扭转速度进行试验。

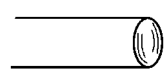
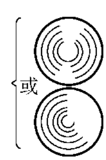
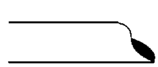
4）试样置于试验机后，以一合适的恒定速度旋转可转动夹头，计数装置同时自动记数，直至试样断裂或达到规定的次数为止。

**2. 试验结果**

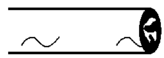
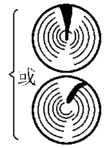
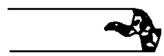
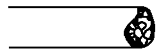
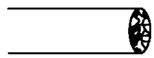
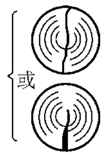
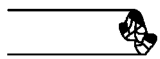
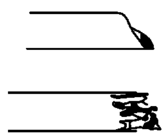
1）当试样的扭转次数、表面及断口符合有关标准规定时，则该试验有效。如果试样未达到规定的次数，且断口位置在离夹头 2$d$（$D$）范围内，则该试验无效。在试验过程中，如试样发生严重劈裂，则最后一次扭转次数不计。

2）试样的扭转断裂类型、外观形貌及断口特征典型分类如表 5-3 所示。

**表 5-3　试样的扭转断裂类型、外观形貌及断口特征典型分类**

| 断裂类型 | 类型编号 | | 外观形貌 | 断口特征描述 | 断裂面 |
|---|---|---|---|---|---|
| 正常扭转断裂 | 1 | a |  | 断裂面平滑且垂直于线材曲线（或稍微倾斜）;断裂面上无裂纹 |  |
| | | c |  | 脆性断裂面与线材轴线约成 45°;断裂面上无裂纹 | |

（续）

| 断裂类型 | 类型编号 | | 外观形貌 | 断口特征描述 | 断裂面 |
|---|---|---|---|---|---|
| 局部裂纹断裂<br>（表面有局部裂纹） | 2 | a |  | 断裂面平滑且垂直于线材轴承（或稍微倾斜），并有局部裂纹 | <br> |
| | | b |  | 阶梯式，部分断裂面平滑，并有局部裂纹 | |
| | | c |  | 不规则断裂面，断裂面上无裂纹 |  |
| 螺旋裂纹断裂<br>（试样全长或大部分长度上有螺旋形裂纹） | 2 | a |  | 断裂面平滑且垂直于线材轴线（或稍微倾斜），断裂面上有局部或贯穿整个截面的裂纹 | <br> |
| | | b |  | 阶梯式，部分断裂面平滑，有局部或贯穿整个截面的裂纹 | |
| | | c |  | 脆性断裂面与线材轴线约成45°，并有局部或贯穿整个截面的裂纹<br>不规则断裂面，并有局部或贯穿整个截面的裂纹 | |

## 5.3　金属线材单向扭转试验

金属线材单向扭转试验按照 GB/T 239.1—2012《金属材料　线材　第 1 部分：单向扭转试验方法》进行。

### 5.3.1　试样

1）试样应尽可能是平直的。必要时可采用适当的方法对试样进行矫直。矫直时，不得损伤试样表面，也不得扭曲试样。

2）存在局部硬弯的线材不得用于试验。

3）试样形状尺寸如图 5-7 所示。

4）除另有规定外，两夹头间的标距长度应符合表 5-4 规定。

**表 5-4　根据线材公称直径或特征尺寸所确定的夹头间标距长度**

| 线材公称直径 $d$ 或特征尺寸 $D$/mm | 两夹头间标距长度 $L$(公称值)①/mm |
|---|---|
| 0.1 ~ <1 | 200$d$(D) |
| 1 ~ <5 | 100$d$(D) |
| 5 ~10 | 50$d$(D) |
| >10 ~14 | 22$d$(D)② |

① 夹头间标距长度最大为 300mm。

② 适用于钢线材。

## 5.3.2　试验设备

1）试验机夹头中夹块齿面应相互平行，夹块硬度≥55HRC。常用夹块齿面类型如表 5-5 所示。公称直径或特征尺寸为 10 ~ 14mm 钢线材，应根据不同的试样材质硬度选用合适硬度的夹块进行试验，一般推荐夹块的硬度高于试样硬度 20HRC 左右。

**表 5-5　夹块齿面类型**

| $d(D)$/mm | 夹块齿面类型 |
|---|---|
| 0.1 ~ <0.3 | 光面夹具 |
| 0.3 ~ <3 | 细锯齿夹具 |
| 3 ~ 10 | V 型槽夹具 |
| >10 ~ 14 | 光面夹具①或其他类型夹具 |

① 可适用于钢线材。

2）试验机自身不得妨碍由试样收缩所引起的夹头间长度的变化，试验机能够对试样施加适当的拉紧力。

试验期间，试验机的两个夹头应保持在同一轴线上，对试样不施加任何弯曲力。

试验机的一个夹头应能绕试样轴线旋转，而另一个不得有任何转动，除非这种角度变形被用于测定扭矩。

为了适应不同长度的试样，试验机夹头间的距离应可以调节和测量。

3）试验机的速度应能调节，并有自动记录扭转次数的装置。

## 5.3.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）试验一般应在 10 ~ 35℃下进行，如有特殊要求，试验温度应为 23℃ ±5℃。

2）将试样置入试验机夹头中，使其轴线与夹头中轴线相重合，这样可确保试样在试验过程中保持平直。除另有规定外，可以对试样持续施加拉紧力，拉紧力不得大于该线材公称抗拉强度相应力值的 2%。对直径（或特征尺寸）为 10 ~ 14mm 的钢线材无需施加拉紧力。

3）将试样置入试验机夹头后，以一合适的恒定速度旋转可转动夹头，直至试样达到规定的扭转次数 $N_t$ 或断裂为止。根据夹头带动试样所旋转的完整圈数来记数。为了验证旋转圈数，可以在试样表面画上彩色标记线。

4）除非另有规定，否则扭转速度不应超过表 5-6 中的规定值。该表中钢、铜及铜合金、铝及铝合金线材应根据其直径选用对应的扭转速度。

单向扭转属于等温试验过程，对于应变速率敏感的线材或应变速率行为缺乏了解的线材，应避免试样温度明显升高，试样温度不得超过 60℃。对于应变速率不敏感的钢线材，为提高试验效率，可使用表 5-6 中较高的转速值。

**2. 结果表示**

1）当试样的扭转次数 $N_t$ 达到有关规定时，则可以认为该试样通过测试而不必考虑断口位置。

**表 5-6　扭转速度**

<table>
<tr><td rowspan="2">线材公称直径 $d$ 或<br>特征尺寸 $D$/mm</td><td colspan="3">扭转速度最大值/(r/s)</td></tr>
<tr><td>钢</td><td>铜及铜合金</td><td>铝及铝合金</td></tr>
<tr><td>0.1～<1</td><td>1 或 3①</td><td>5</td><td rowspan="6">1</td></tr>
<tr><td>1～<1.5</td><td rowspan="4">0.5 或 1①</td><td>2</td></tr>
<tr><td>1.5～<3</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>3～<3.6</td><td rowspan="2">1</td></tr>
<tr><td>3.6～<5</td></tr>
<tr><td>5～10</td><td>0.25 或 0.5①</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>>10～14</td><td>0.1</td><td>—</td><td>—</td></tr>
</table>

① 此速度仅适用于对应变速率不敏感的钢线材。

如果试样未达到有关规定的扭转次数，且断口位置在离夹头 $2d$（$D$）范围内，则可判定该试验无效，应重新取样进行复测。

2）根据表 5-3 评估试样的断裂类型。

## 5.4　金属线材双向扭转试验

金属线材双向扭转试验按照 GB/T 239.2—2012《金属材料　线材　第 2 部分：双向扭转试验方法》进行。

### 5.4.1　试样

1）试样应尽可能是平直的。

2）必要时，可手工对试样进行矫直，当手工不能矫直时，可将试样置于木材、塑料或软质金属上，用这些材料制成的锤子或其他合适的方法矫直。

3）矫直时，不得损伤试样表面，也不得扭曲试样。

4）存在局部硬弯的线材不得用于试验。

5）除另有规定外，试验机夹头间的标距长度应符合表 5-7 规定。

**表 5-7　线材公称直径与标称长度**　　（单位：mm）

| 线材公称直径 $d$ | 两夹头间标距长度 |
|---|---|
| 0.3～<1.0 | $200d$ |
| 1.0～<5.0 | $100d$① |
| 5.0～<10.0 | $50d$② |

① 特殊协议时可采用 $50d$。

② 特殊协议时可采用 $30d$。

### 5.4.2　试验设备

1）试验机夹头应具有足够的硬度抵抗磨损。试验期间，两夹头保持在同一轴线上，并对试样不施加任何弯曲力。

2）试验机能够对试样施加适当的拉紧力，试验机自身不得妨碍因试样收缩所引起的夹头间长度的变化。

3）试验机的一个夹头应能绕试样轴线双向转动，而另一个不得有任何转动，除非这种角度变形被用于测定扭矩。

4）为了适应不同长度的试样，试验机夹头间的距离应可以调节和测量。

5）试验机的扭转速度应能调节，并配置自动记录扭转次数的装置。

6）试验时试样可能断为几节飞出，试验机应提供安全防护装置，保护操作者免受伤害。

### 5.4.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）试验一般应在 10～35℃下进行，如有特殊要求，试验温度应为 23℃ ±5℃。

2）将试样置于试验机夹持钳口中，使其轴线与夹头轴线相重合。为使试样在试验过程中保持平直，应施加一定的预拉紧力，但该拉紧力不得大于该线材公称抗拉强度的2%。

3）试样固紧于试验机夹头后，以不大于 1r/s（当线材直径不小于 5mm 时，不大于 0.5r/s）的恒定速度旋转可转动夹头，用相关标准规定的转数向一个方向转动后，再以相同的转速向相反方向转动到规定次数或断裂，一转为 360°。

**2. 结果表示**

（1）正向旋转时断裂　当试样的扭转次数 $N_t$ 达到有关规定时，则可以认为该试样通过测试而不必考虑断口位置。如果试样未达到有关规定的扭转次数，且断口位置在离夹头 $2d$（$D$）范围内，则可判定该试验无效，应重新取样进行复测。根据表 5-3 评估试样的断裂类型。

（2）正向旋转时未断裂　进行反向扭转，反向扭转后没有明显缺陷说明试样符合试验要求。

## 5.5　塑料扭转刚性试验

塑料扭转刚性试验按照 GB/T 15047—1994《塑料扭转刚性试验方法》进行。

### 5.5.1　试样

采用压制或机加工方法制作试样。试样形状为长方形，其尺寸如图 5-8 所示，厚度为 1～3mm。

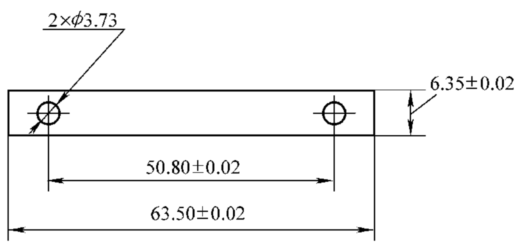



图 5-8　试样的尺寸

每组试样取两个，对于非均质材料，应于纵、横向各取两个。

按 GB/T 2918 规定的标准环境及正常偏差范围进行，状态调节时间至少 40h。对于吸湿性塑料，状态调节后，应立即进行试验。

## 5.5.2　试验设备

**1. 试验机**

扭转试验机应能够施加足够扭矩，使试样扭转 5°～100°，并且跨距与宽度之比为 6～8。扭转试验机如图 5-9 所示。

砝码的精度为 1g，保温瓶的容量为 1000mL，温度计的精度为 1℃，并具有所需的测量范围。

**2. 传热介质**

传热介质在试验的温度范围内为液态的物质，并对试样没有软化作用或其他影响。常用的传热介质有水、乙醇、丁醇、丙酮、正己烷、硅油以及体积之比为 87∶13 的磷酸甲酯与水的混合物。此外，50 体积份乙醇、30 体积份乙二醇和 20 体积份水混合物适用于 -70℃ 的低温试验。

**3. 制冷**

按所需的温度，采用制冷机或干冰。

**4. 加热器**

采用浸入式电加热器。

**5. 测微计**

测微计精度为 0. 01mm。

**6. 游标卡尺**

游标卡尺精度为 0. 02mm。

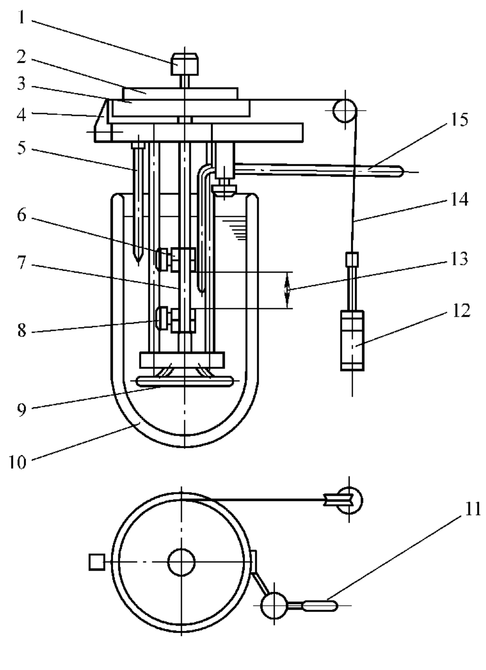



图 5-9　扭转试验机

1—复位旋钮　2—扭矩轮　3—刻度轮　4—指针　5—温度传感器　6—上夹头　7—试样　8—下夹头　9—加热器　10—保温瓶　11—止动杆　12—砝码　13—跨距　14—负荷绳　15—温度计

## 5.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1） 测量试样的宽度和厚度。

2） 将试样固定在夹具上。

3） 于负荷绳上施加所需的砝码。

4） 将温度计置于试验机的定位装置内，感温泡应尽量靠近试样。

5） 将传热介质注满保温瓶，介质温度应稍低于所试验的最低温度。

6）将保温瓶放在试验机固定位置。

7）开动浸入式加热器及搅拌器，使介质均匀达到所要求的试验温度。

8）试样在该温度下平衡 180 ~ 185s 后，松开扭矩轮，5s 后记录扭矩轮的扭转角，然后把扭矩轮返回到“0”。如果读数没有落在 5° ~ 100°的范围内，则需改变施加的扭矩，继续按上述方式试验，直至产生合适的读数。

**2. 结果表示**

某个温度下的表观刚性模量（由于试样超出弹性极限扭曲及材料蠕变特性的影响，形成不同于弹性极限内的刚性模量）由下式计算：

$$G=\frac{917LT}{b\delta^3\mu\phi}$$

$$T=WR$$

$$\mu=5.33-3.36\frac{\delta}{b}\left(1-\frac{\delta^4}{12b^4}\right)$$

式中　$G$——表观刚性模量，单位为 Pa；

$T$——施加的扭矩，单位为 N · m；

$L$——跨距，单位为 m；

$b$——试样宽度，单位为 m；

$\delta$——试样厚度，单位为 m；

$\mu$——系数，取决于 $b/\delta$ 比值（可由表 5-8 直接读出）；

$\phi$——扭转角，单位为（°）；

$W$——用于施加扭矩轮的砝码总重力，单位为 N；

$R$——扭矩轮半径与负荷绳半径之和，单位为 m。

**表 5-8　$\mu$ 与宽厚比（$b/\delta$）之间的关系**

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b/\delta$ 比值 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 |
| $\mu$ | 2.64 | 2.82 | 2.98 | 3.13 | 3.26 | 3.37 | 3.48 |
| $b/\delta$ 比值 | 1.90 | 2.00 | 2.25 | 2.50 | 2.75 | 3.00 | 3.50 |
| $\mu$ | 3.57 | 3.66 | 3.84 | 3.99 | 4.11 | 4.21 | 4.37 |
| $b/\delta$ 比值 | 4.00 | 4.50 | 5.00 | 5.50 | 6.00 | 6.50 | |
| $\mu$ | 4.49 | 4.58 | 4.66 | 4.72 | 4.77 | 4.81 | |

# 第 6 章　材料剪切性能测定试验

## 6.1　金属线材和铆钉剪切试验

金属材料抵抗侧面受大小相等、方向相反、作用线相近的外力作用而沿外力作用线平行的受剪面产生错动的能力，叫做材料的剪切性能。

工程结构中的一些零件除承受拉伸、压缩和弯曲等载荷作用外，还有一些零件（如桥梁结构中的铆钉、销子等）主要承受剪切力的作用。对这些零件所使用的材料要进行剪切试验，提供材料的抗剪强度作为设计依据。

（1）双剪切试验　双剪切试验如图 6-1 所示，它是以剪断圆柱状试样的中间段方式来实现的。两侧支承距离应不小于中间被切断部分直径的 1/2。双剪切试验夹具刀口形状如图 6-2 所示。

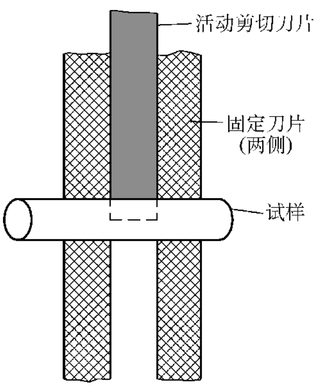



图 6-1　双剪切试验

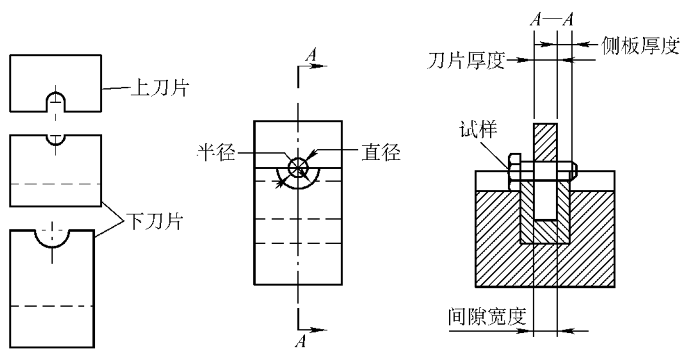



图 6-2　双剪切试验夹具刀口形状

双剪切试验的特点是有两个处于垂直状态下的剪切刀片。下刀片（厚度大小为被剪切试样直径大小）平行地放置在上方，上下刀片都作成孔状，孔径等于试样直径。利用万能拉伸试验机便可进行双剪切试验。

进行双剪切试验时，刀片应当平行、对中，剪切刀刃不应有擦伤、缺口或不平整的磨损。

（2）单剪切试验　单剪切试验夹具使用两个剪切刀片，刀片中间带孔，如图 6-3 所示。当一个刀片固定不动，另一个刀片在图示平行面内移动时产生单剪切作用，剪断试样。

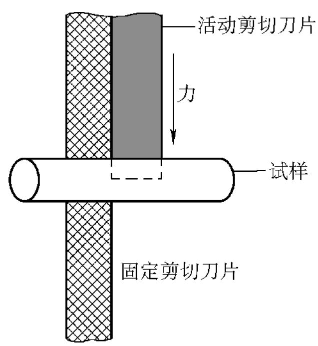



图 6-3　单剪切试验

单剪切试验适合于测定长度太短不能进行双剪切的

紧固件的剪切值，包括杆长小于直径 2.5 倍的紧固杆件。单剪切试验的准确度低于双剪切试验，如果发现单剪切值有问题时，可以用双剪切值作校核。

金属线材和铆钉剪切试验按照 GB/T 6400—2007《金属材料　线材和铆钉剪切试验方法》进行。

### 6.1.1　试样

**1. 线材试样**

1）试样表面应光滑，无裂纹、夹层、凹痕、擦伤、锈蚀等缺陷。

2）试样直径的测量精度为 0.01mm，横截面积计算精确到 $0.01mm^2$。

3）线材稍有弯曲，可以在木垫上用木锤轻敲矫直，但在矫直过程中应尽量将加工硬化对性能的影响降到最低，且不应该损伤试样，试样尖锐棱边应去掉。

4）直径大于 6mm 的线材，可加工成直径不大于 6mm 的试样进行试验，凡需切削加工后进行试验的试样，按图 6-4 的要求制备。

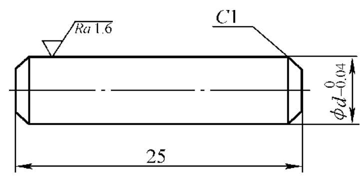



图 6-4　剪切试样

$d$—试样直径（mm）

**2. 铆钉试样**

1）从线材上切取一段适当长度的试样样坯，其上应附有牌号、规格、批号、试样号及特殊热处理制度和试验日期等标记。

2）试样表面应光滑，无裂纹、夹层、凹痕、擦伤、锈蚀等缺陷。

3）试样直径的测量精度为 0.01mm，横截面积计算精确到 $0.01mm^2$。

4）每批铆钉试样取不少于 6 个试样，每盘金属丝两端 0.5m 处各取 3 个试样。凡在零件或其他金属制品上切取试样时，每一部位每一取向的试样数量不少于 3 个。

5）试样的长度（$L$）直径（$d$）的关系为 $L = 1.4d + 10mm$。

6）从样坯上切取试样时不允许损伤试样原表面。试样的两个端面应平整，并与中心线垂直，周边无毛刺。

### 6.1.2　试验设备

1）可以使用各种类型的拉力、压力或万能试验机进行试验，试验机应保证使夹具的中心线与试验机的加力轴线一致，加力应连续、平稳、无振动。

2）试验机准确度应为 1 级或优于 1 级。

3）试验时可以使用各种形式的双剪夹具，剪切圈和支承圈应采用高强度合金且在试验温度下有足够硬度的材料（屈服强度应高于被剪切材料的抗拉强度）。

4）剪切圈、支承圈孔径和试样直径之间的间隙不大于 0.1mm，剪切圈和支承圈之间的间隙不大于 0.1mm。剪切圈、支承圈的厚度为线材直径的 1.3 ~ 3.0 倍，其刀口应锐利、无缺损。

5）切刀、夹板、剪切圈和支承圈表面应光滑，表面粗糙度 $Ra$ 的最大值为 1.6μm。

6）切刀之间的摩擦力应尽量小而不至于影响载荷值。

7）高温剪切夹具如图6-5所示。其主要部件切刀、键、夹板、剪切圈和支承圈如图6-6～图6-10所示。

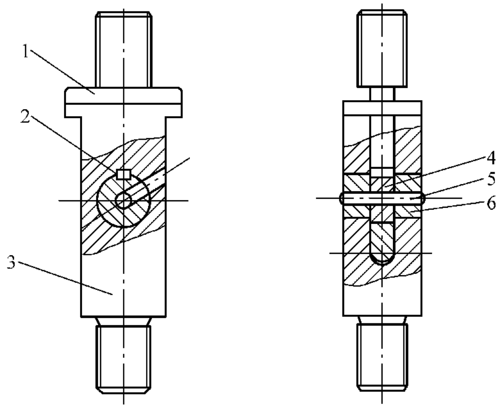



图6-5　高温剪切夹具

1—切刀　2—键　3—夹板　4—剪切圈　5—试样　6—支承圈

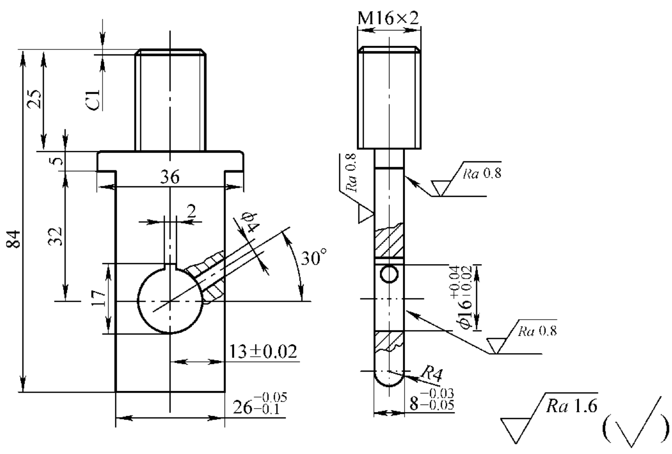



图6-6　切刀

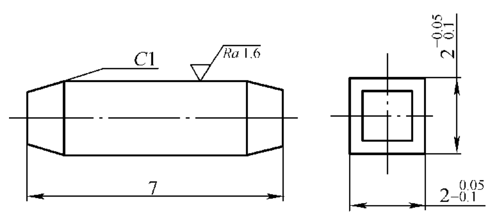



图6-7　键

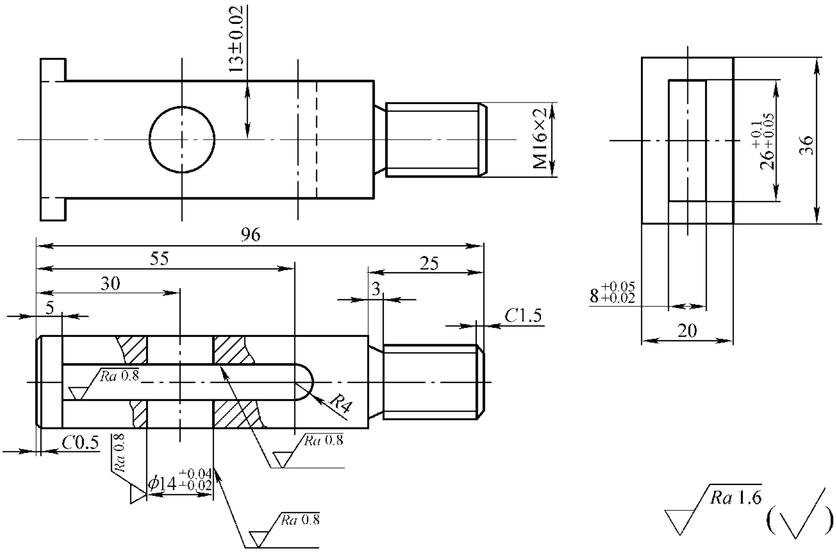



图 6-8　夹板

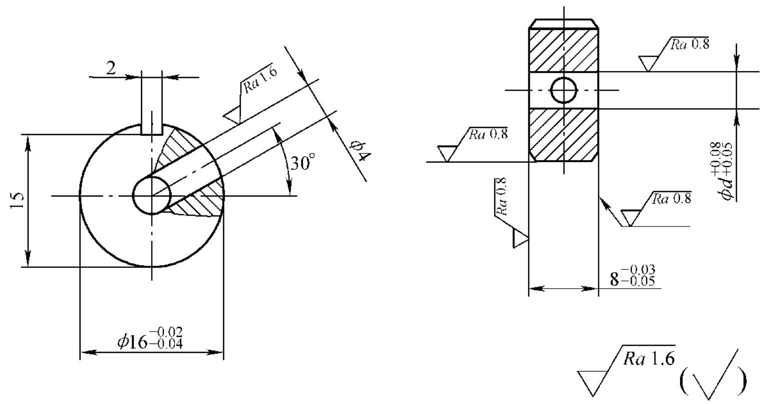



图 6-9　剪切圈

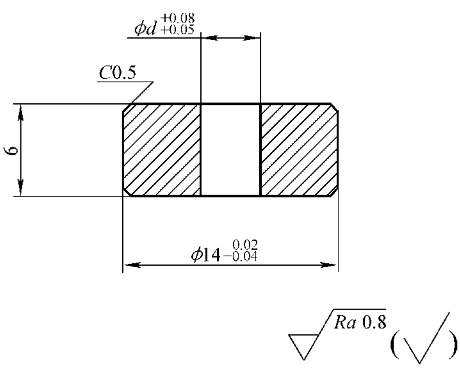



图 6-10　支承圈

8）室温拉式双剪夹具如图6-11所示。铆钉线试验所用夹具的尺寸及偏差如图6-12和表6-1所示。

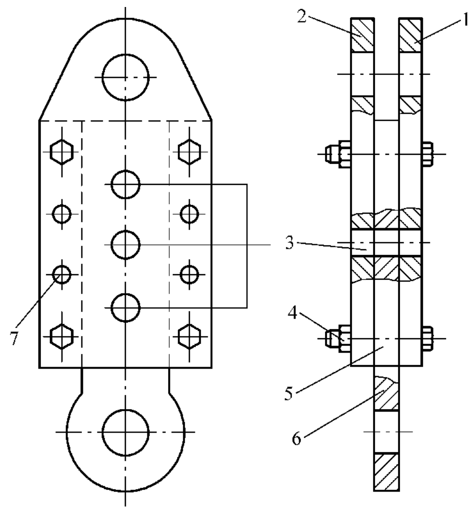



图6-11　室温拉式双剪夹具

1、2—外切刀　3—剪切孔　4—螺栓　5—垫板　6—内切刀　7—定位销

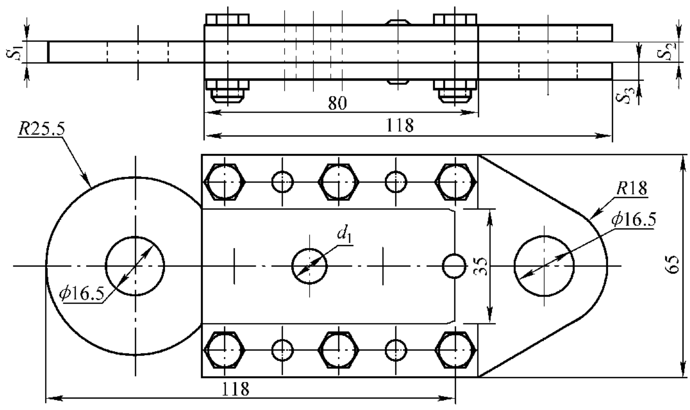



图6-12　室温拉式双剪夹具尺寸

**表6-1　室温拉式双剪夹具的尺寸及偏差**　（单位：mm）

| 铆钉线公称直径 $d$ | 工作孔 | | 剪刀 | | 垫块 | | 夹板公称厚度 $S_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 公称直径 $d_1$ | 偏差 | 公称厚度 $S_1$ | 偏差 | 公称厚度 $S_2$ | 偏差 | |
| >1.6~4 | $d+0.05$ | $^{+0.025}_{0}$ | 6 | $^{0}_{-0.010}$ | $S_1+0.015$ | $^{+0.015}_{0}$ | 5 |
| >4~8 | | | 8 | | | | 6 |
| >8~10 | | | 12 | | | | 8 |

9）室温拉式单剪夹具如图6-13所示。

### 6.1.3　试验内容及结果表示

**1. 室温剪切试验**

1）室温试验应在 10 ~ 35℃范围内进行，高温试验在规定温度下进行。

2）剪切试验速度（试验机横梁移动速度）不大于 5mm/min。

3）室温双剪试验时，按下式计算抗剪强度：

$$\tau_b = \frac{F_m}{2S_0}$$

室温单剪试验时，按下式计算抗剪强度：

$$\tau_b = \frac{F_m}{S_0}$$

式中　$\tau_b$——抗剪强度，单位为 MPa；

$F_m$——最大试验力，单位为 N；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

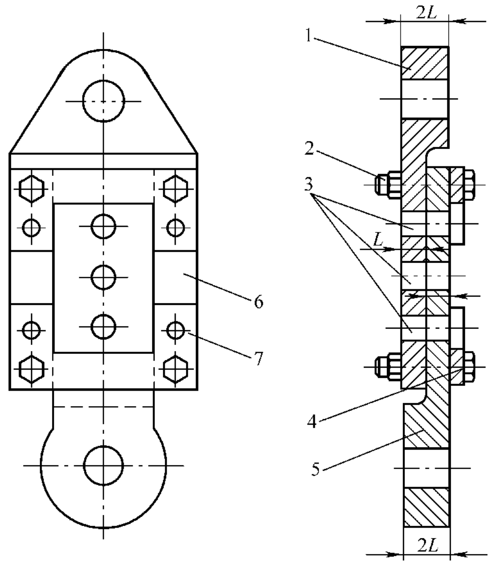



图 6-13　室温拉式单剪夹具

1—切刀　2—螺栓　3—剪切孔　4—压板　5—切刀　6—垫板　7—定位销

**2. 高温剪切试验**

1）高温试验在试样上用一支热电偶直接测量试样中部温度。

2）高温试验试样加热到试验温度的时间一般不大于 1h，保温时间为 15 ~ 30min，然后施加试验力，记录试样剪切时的最大试验力。

3）剪切试验速度（试验机横梁移动速度）不大于 5mm/min。

4）高温抗剪强度按下式计算：

$$\tau_{b,t} = \frac{F_m}{2S_0}$$

式中　$\tau_{b,t}$——试验温度下的抗剪强度，单位为 MPa；

$F_m$——最大试验力，单位为 N；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

**3. 结果表示**

1）剪断后，如果试样发生弯曲，或断口出现楔形、椭圆形等剪切截面，则试验结果无效。

2）试验结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如果未规定具体要求，抗剪强度的计算精确到 3 位有效数字，数字修约方法按 GB/T 8170 进行。

## 6.2　销的剪切试验

销的剪切试验按照 GB/T 13683—1992《销　剪切试验方法》进行。

### 6.2.1　试样

剪切试验用试样为公称直径 0.8 ~25mm 的金属销。

### 6.2.2　试验设备

1）销的剪切试验在夹具中完成，典型的夹具如图 6-14 所示。在夹具中销子支承各个零件。为了施加载荷，各配合零件应有与销公称直径相等的孔径（公差为 H6），且维氏硬度不低于 700HV。支承零件与加载零件间的间隙不应超过 0.15mm。

2）剪切面与销的每一末端面应最少留有一倍销径的距离，同时两剪切面间的间距最少应为两倍销径。

3）当销子太短而不能作双面剪切试验时，应改用两个销子同时作单面剪切试验。

4）弹性销在试验夹具中的安装应使槽口向上。

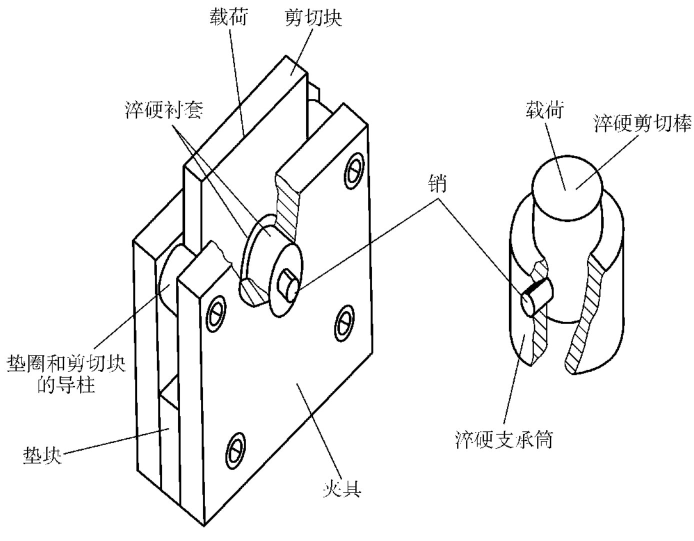



图 6-14　销剪切试验夹具

### 6.2.3　试验内容及结果表示

1）试验速度应不大于 13mm/min。

2）销子应试验到剪断为止。当试验载荷达到最大载荷的同时销子断裂，或未达到最大载荷之前销子断裂，都认为断裂时的载荷是销子的双面剪切载荷。

3）销子经剪切试验后断裂口应为没有纵向裂缝的韧性切口。

## 6.3　塑料穿孔法剪切试验

塑料穿孔法剪切试验按照 HG/T 3839—2006《塑料剪切强度试验方法　穿孔法》进行。

## 6.3.1　试样

1）该试验适用于硬质热塑性塑料和热固性塑料，包括填充塑料和纤维增强复合材料，不适用于泡沫塑料。

2）试样厚度应均匀，表面光洁、平整、无机械损伤及杂质。

3）试样是边长为 50mm 的正方形或直径为 50mm 的板，厚度为 1.0～12.5mm，中心有一直径为 11mm 的孔，如图 6-15 所示。仲裁试样厚度为 3～4mm。

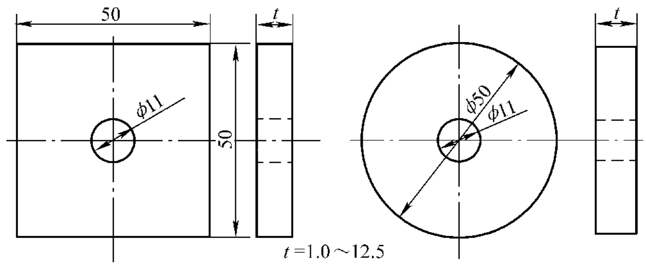



图 6-15　剪切试样

4）试样的制备可按有关标准或双方协议采用注塑、压制或挤出成型等方法，也可用机械加工方法从成型板材上切取。不同加工方法所测结果不能相互比较。

5）每组试样不少于 5 个。

## 6.3.2　试验设备

**1. 试验机**

任何一种能使十字头恒速运动，有自动对中和变形测量装置，可作压缩试验的试验机均可使用。

1）负荷指示计应能指示试验过程中任一时刻施加于试样的剪切负荷，精度为指示值的 ±1%。

2）变形测量装置应能测量试验过程中任一时刻穿孔器压入试样的深度，准确到 0.01mm。

**2. 剪切夹具**

剪切夹具是将剪切负荷施加于试样的器具，由穿孔器和压模构成。要求具有能把试样正确地固定在夹具的穿孔器和压模上的功能，并能将负荷均匀地施加于试样。剪切夹具的形状和尺寸如图 6-16 和表 6-2 所示。

**表 6-2　剪切夹具关键部位的尺寸**　（单位：mm）

| | |
|---|---|
| 压模内径 $d$ | 25.40 |
| 穿孔器直径 $D$ | 25.37 |
| 压模内径 $d$ 与穿孔器直径 $D$ 之差 | 0.03 |

夹具材质为碳素工具钢 T10，洛氏硬度大于 62HRC，或与之相当的材料。

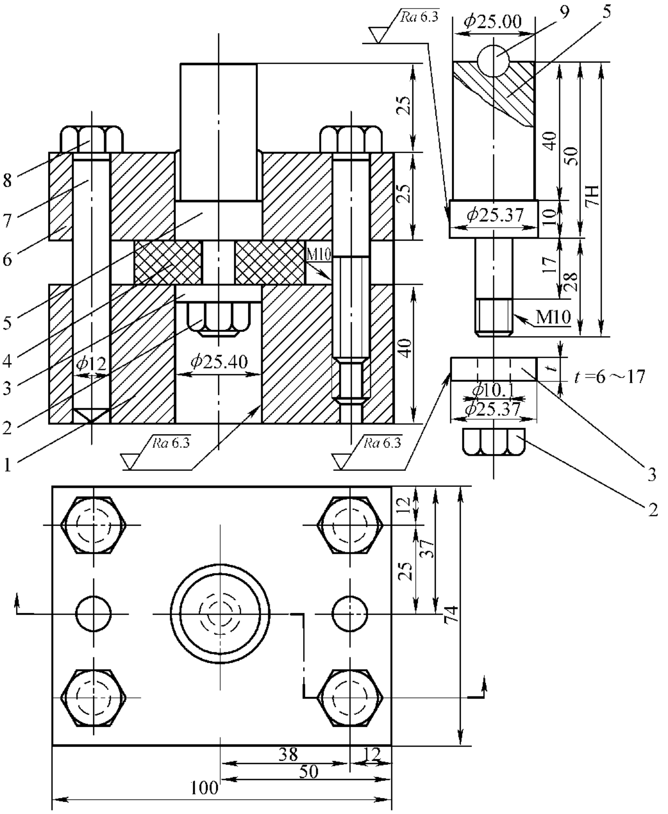



图 6-16　剪切夹具

1—下模　2—螺母　3—垫片　4—试片　5—穿孔器　6—上模
7—模具导柱　8—螺栓　9—淬火钢球

**3. 测微计**

测微计应能测定试样厚度，精度为 0.01mm。

## 6.3.3　试验内容及结果表示

该试验采用圆形穿孔器用压缩剪切的方式，将剪切负荷施加于试样，使试样产生剪切变形或破坏，以测定材料的剪切强度。

**1. 试验步骤**

1）在试样受剪切部位均匀取 4 点测量厚度，精确至 0.01mm，取平均值为试样厚度。

2）试验速度为 50mm/min ± 1mm/min。

3）将穿孔器插入试样的圆孔中，放上垫圈用螺母固定。然后，把穿孔器装在夹具中，再将夹具用 4 个螺栓均匀固定，以使试样在试验过程中不产生弯曲。

4）安装夹具时，应使剪切夹具的中心线与试验机的中心线重合。

5）起动试验机，对穿孔器施加压力，记录最大负荷（或破坏负荷、屈服负荷、定变形率负荷）。需要时可记录变形，然后卸去压力取出试样。

注：破坏负荷是指试样破坏时的剪切力；屈服负荷是指在负荷-变形曲线上负荷不随变形增加的第一个点的力；变形率是指在剪切负荷下穿孔器压入试样的深度与试样厚度之比；定变形率负荷是指在剪切应力-变形率曲线上，于规定变形率处的剪切力。

**2. 结果表示**

剪切强度按下式计算：

$$\tau = \frac{F}{\pi D t}$$

式中　$\tau$——剪切强度（或破坏剪切强度、屈服剪切强度、定变形剪切强度），单位为 MPa；

$F$——剪切负荷，单位为 N；

$D$——穿孔器直径，单位为 mm；

$t$——试样厚度，单位为 mm。

测定剪切强度时，$F$ 为最大负荷；测定破坏剪切强度时，$F$ 为破坏负荷；测定屈服剪切强度时，$F$ 为屈服负荷；测定规定变形率剪切强度时，$F$ 为规定变形率时剪切负荷。规定变形率的数值应经有关双方协商确定。

试验结果以算术平均值表示，取 3 位有效数字，按 GB/T 8170 修约。

## 6.4　纤维增强塑料层间剪切试验

纤维增强塑料层间剪切试验按照 GB/T 1450.1—2005《纤维增强塑料层间剪切强度试验方法》进行。

### 6.4.1　试样

**1. 试样的形状和尺寸**

1）试样的形状和尺寸如图 6-17 所示。

2）试样 $A$、$B$、$C$ 三面应相互平行，且与织物层垂直。$D$ 面为加工面，且 $D$、$E$、$F$ 面与织物层平行。受力面 $A$、$C$ 应平整光滑。

**2. 机械加工法**

1）试样的取位区，一般宜距板材边缘（已切除工艺毛边）30mm 以上，最小不得小于 20mm。若取位区有气泡、分层、树脂淤积、皱褶、翘曲、错误铺层等缺陷，则应避开。

2）若对取位区有特殊要求或需从产品中取样时，则按有关技术要求确定，并在试验报告中注明。

3）纤维增强塑料一般为各向异性，应按各向异性材料的两个主方向或预先规定的方向（例如板的纵向和横向）切割试样，且严格保证纤维方向和铺层方向与试验要求

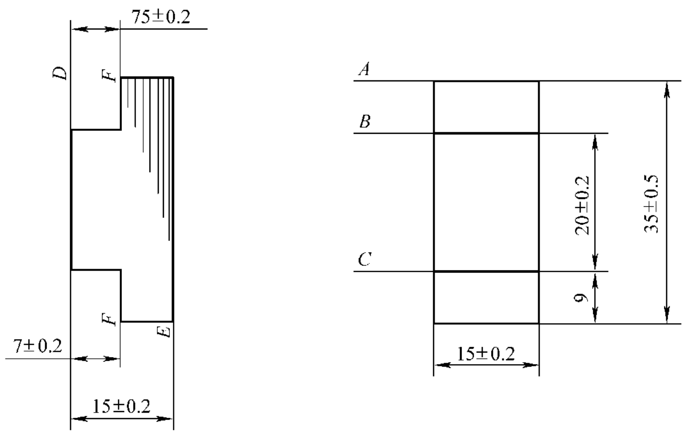



图 6-17　试样的形状和尺寸

相符。

4）纤维增强塑料试样应采用硬质合金刃具或砂轮片等加工。加工时要防止试样产生分层、刻痕和局部挤压等机械损伤。

5）加工试样时，可采用水冷却（禁止用油）。加工后，应在适宜的条件下对试样及时进行干燥处理。

6）对试样的成型表面不宜加工。当需要加工时，一般单面加工，并在试验报告中注明。

**3. 模塑法**

模塑成型的试样按产品标准或技术规范的规定进行制备。在试验报告中注明制备试样的工艺条件及成型时受压的方向。

**4. 试样数量**

试验中取试样 10 个。

## 6.4.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10% ~ 90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%，当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 ±1%。

**2. 剪切夹具**

剪切夹具如图 6-18 所示。

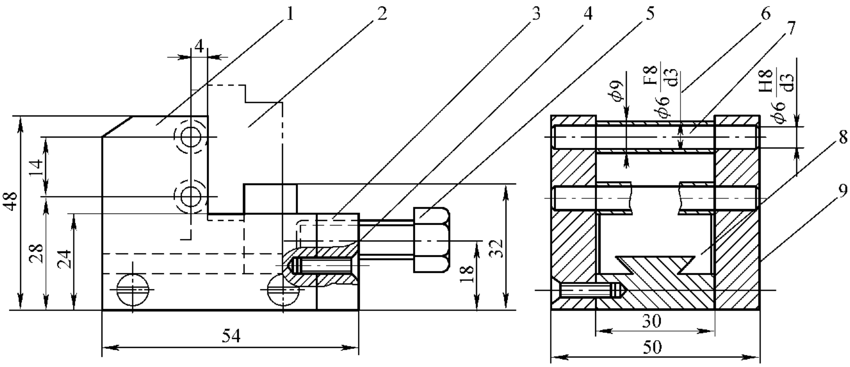



图 6-18　剪切夹具

1—前盖板　2—试样　3—侧盖板　4—螺钉 M4 × 14　5—螺栓 M8 × 30

6—轴套　7 —轴　8—滑块　9—底座

### 6.4.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

对特定形状的试样匀速加载，载荷方向与试样层间方向一致，使其在规定的受剪面内剪切破坏，以测定层间剪切强度。

**2. 试验要求**

1）实验室标准环境条件：①温度为 23℃ ±2℃；②相对湿度为 50% ±10%。

2）若不具备实验室标准环境条件时，选择接近实验室标准环境条件的实验室环境条件。

3）测量试样任一横截面的直径，测量值精确至 0.1mm。

**3. 加载速度**

常规试验加载速度为 5 ~15mm/min，仲裁试验加载速度为 10mm/min。

**4. 试验步骤**

1）试验前，试样需经外观检查，如有缺陷和不符合尺寸及制备要求者，应予作废。

2）试样状态调节：①试验前，试样在实验室标准环境条件下至少放置 24h；②若不具备实验室标准环境条件，试验前，试样可在干燥器内至少放置 24h；③特殊状态调节条件按需要而定。

3）将合格试样编号，测量试样受剪面任意三处的高度和宽度，取算术平均值。试样尺寸测量精确到 0.01mm。

4）将试样放入层间剪切夹具中，*A* 面向上，夹持时以试样能上下滑动为宜，不可过紧。然后把夹具放置试验机上，使受力面 *A* 的中心对准试验机上压板中心。压板的表面必须平整光滑。

5）对试样施加均匀、连续的载荷，直至破坏，记录破坏载荷。

6）有明显内部缺陷或不沿剪切面破坏的试样，应予作废。同批有效试样不足5个时，应重作试验。

**5. 结果表示**

层间剪切强度按下式计算：

$$\tau_s = \frac{F_b}{bh}$$

式中 $\tau_s$——层间剪切强度，单位为MPa；

$F_b$——破坏或最大载荷，单位为N；

$h$——试样受剪面高度，单位为mm；

$b$——试样受剪面宽度，单位为mm。

## 6.5 纤维增强塑料冲压式剪切强度试验

纤维增强塑料冲压式剪切强度试验按照GB/T 1450.2—2005《纤维增强塑料冲压式剪切强度试验方法》进行。

### 6.5.1 试样

1）纤维增强塑料板材试样如图6-19所示。试样采用机械加工法制备。当板厚大于6mm时，单面加工至6mm±0.1mm。

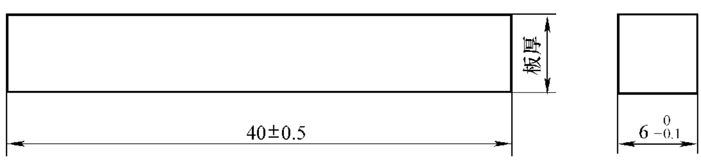



图6-19 纤维增强塑料板材试样

2）短切纤维增强塑料剪切试样如图6-20所示。试样可直接模塑或从与试样同厚度的模塑板材上加工。

3）短切纤维增强塑料剪切仲裁试样的厚度为4mm。

4）试样的取位区一般宜距板材边缘（已切除工艺毛边）30mm以上，最小不得小于20mm。若取位区有气泡、分层、树脂淤积、皱褶、翘曲、错误铺层等缺陷，则应避开。

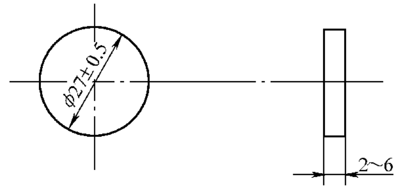



图6-20 短切纤维增强塑料剪切试样

5）若对取位区有特殊要求或需从产品中取样时，则按有关技术要求确定，并在试验报告中注明。

6）纤维增强塑料一般为各向异性，应按各向异性材料的两个主方向或预先规定的方向（例如板的纵向和横向）切割试样，且严格保证纤维方向和铺层方向与试验要求相符。

7）纤维增强塑料试样应采用硬质合金刃具或砂轮片等加工。加工时要防止试样产生分层、刻痕和局部挤压等机械损伤。

8）加工试样时，可采用水冷却（禁止用油）。加工后，应在适宜的条件下对试样及时进行干燥处理。

9）对试样的成型表面不宜加工。当需要加工时，一般单面加工，并在试验报告中注明。

10）试验中取试样 10 个。

## 6.5.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差应不超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10% ~ 90% 范围内（尽量落在满载的一边），且应不小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%，当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均应不超过 ±1%。

**2. 剪切夹具**

1）剪切夹具见如图 6-21 所示。

2）测定断纹剪切强度时，也可采用方柱冲头剪切夹具。方柱冲头剪切夹具如图 6-22所示。

## 6.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

将试样置于特定夹具中，对其匀速加载，使其沿厚度方向剪切破坏，测定剪切强度。

**2. 试验要求**

1）实验室标准环境条件：①温度为 23℃ ±2℃；②相对湿度为 50% ±10%。

2）若不具备实验室标准环境条件时，选择接近实验室标准环境条件的实验室环境条件。

3）测量试样任一横截面的直径，测量值精确至 0.1mm。

**3. 加载速度**

常规试验加载速度为 1.5 ~ 5mm/min，仲裁试验加载速度为 2mm/min。

**4. 试验步骤**

1）试验前，试样需经外观检查，如有缺陷和不符合尺寸及制备要求者，应予作废。

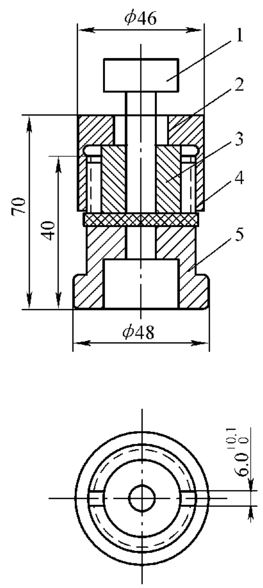



图 6-21　剪切夹具

1—圆柱冲头　2—上压盖　3—上压块

4—试样　5—底座

注：俯视图为移去 1 ~ 4 后的视图。

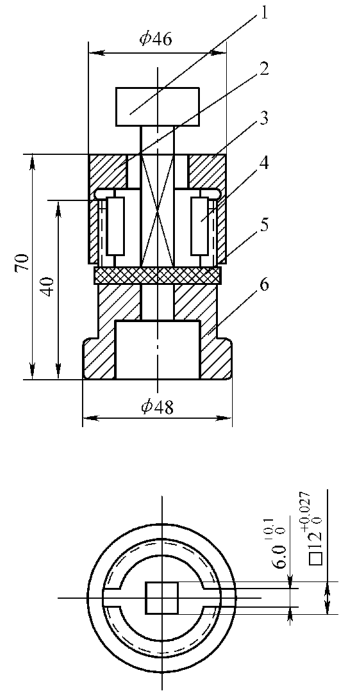



图 6-22　方柱冲头剪切夹具

1—方柱冲头　2—上压块　3—上压盖

4—键　5—试样　6—底座

注：俯视图为移去 1 ~ 5 后的视图。

2）试样状态调节：①试验前，试样在实验室标准环境条件下至少放置 24h；②若不具备实验室标准环境条件，试验前，试样可在干燥器内至少放置 24h；③特殊状态调节条件按需要而定。

3）将合格试样编号。对矩形试样，测量试样受剪面两处的宽度和厚度，取算术平均值；对圆形试样，测量试样受剪面三处的厚度，取算术平均值。试样尺寸测量精确到 0. 01mm。

4）将试样放入剪切夹具的底座中，装上压块，拧紧上压盖，确保试样与其接触的上压块及底座之间没有间隙，最后安上冲头。

5）将安装好试样的剪切夹具放在试验机上，使冲头的中心对准试验机上压板的中心。压板的表面必须平整光滑。

6）通过冲头对试样施加均匀、连续的载荷，直至破坏。记录破坏载荷。

7）有明显内部缺陷或不沿剪切面破坏的试样，应予作废。同批有效试样不足 5 个时，应重作试验。

8）记录试验过程中载荷、破坏形式。

**5. 结果表示**

1）断纹剪切强度按下式计算：

$$\tau_s = \frac{F_b}{2bhK}$$

式中　$\tau_s$——断纹剪切强度，单位为 MPa；

$F_b$——破坏或最大载荷，单位为 N；

$h$——试样受剪面高度，单位为 mm；

$b$——试样受剪面宽度，单位为 mm；

$K$——曲面换算系数（$K=1.047$，是在圆柱冲头直径为试样宽度 2 倍的情况下计算而得）。

2）短切纤维增强塑料剪切强度按下式计算：

$$\tau_s = \frac{F_b}{\pi Dh}$$

式中　$\tau_s$——剪切强度，单位为 MPa；

$F_b$——破坏载荷，单位为 N；

$h$——试样受剪面高度，单位为 mm；

$D$——圆柱头直径（$D=12$mm），单位为 mm。

3）当采用方柱冲头剪切夹具测定断纹剪切强度时，断纹剪切强度按下式计算：

$$\tau_s = \frac{F_b}{2bh}$$

式中　$\tau_s$——断纹剪切强度，单位为 MPa；

$F_b$——破坏或最大载荷，单位为 N；

$h$——试样受剪面高度，单位为 mm；

$b$——试样受剪面宽度，单位为 mm。

## 6.6　硬质橡胶剪切试验

硬质橡胶剪切试验按照 HG/T 3848—2008《硬质橡胶　抗剪切强度的测定》进行。

### 6.6.1　试样

1）试样为长 120mm，宽 15.0mm ± 0.2mm，厚 10.0mm ± 0.2mm 的长方体。

2）试样的正面和侧面进行机械加工，加工面必须平滑光洁，不应有裂纹或其他缺陷。

3）每组试样不少于 3 个。

### 6.6.2　试验设备

**1. 拉伸试验机**

拉伸试验机应符合 JB/T 7797 的规定，其测力精度应达到 B 级，夹持器应以 25 ~ 30mm/min 的速度均匀移动。

**2. 剪切试验装置**

剪切试验装置如图 6-23 所示。该装置由两个钢制拉杆构成（上拉杆和下拉杆），两个拉杆分别固定在试验机上下夹头的位置上。两拉杆的工作部分各有一方孔，高 10.30mm ± 0.05mm，宽 15.40mm ± 0.05mm。上拉杆工作部分宽度均为 30mm，下拉杆的两边工作部分宽度均为 25mm。在初始状态下，上拉杆的方形端部插入下拉杆的凹槽部分，两个拉杆的孔的边缘应对正，形成一个连通孔，剪切面之间的缝隙不应大于 0.1mm。

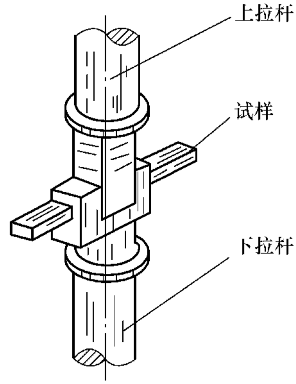


图 6-23　剪切试验装置

## 6.6.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）测量试样中部受剪切负荷部分的厚度和宽度，分别测量 3 点，取中位数，精确到 0.02mm。

2）将上拉杆和下拉杆分别安装在试验机上下夹头上，并调好试验机的零点。

3）将试样放入上拉杆和下拉杆形成的连通孔中，并使试样两端露出部分的长度相等，放于方孔中的试样应宽面向上，以便将剪切负荷施加在试样的宽面上。

4）起动电动机，使拉力机拉杆匀速运动，剪切试样。

5）试样剪切破坏时，记录其最大剪切力值。

6）试验后，检查试样断面是否有气孔、杂质等内部缺陷，如有缺陷该试样数据作废，应重新取样测定。

**2. 结果表示**

硬质橡胶的剪切强度（试样在剪切至破坏过程中所承受的最大剪切应力）按下式计算：

$$\tau = \frac{F}{2bd}$$

式中　$\tau$——剪切强度，单位为 MPa；

$F$——最大剪切负荷，单位为 N；

$b$——试样的宽度，单位为 mm；

$d$——试样的厚度，单位为 mm。

# 6.7　硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度试验

硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度试验按照 GB/T 13936—1992《硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度测定方法》进行。

## 6.7.1　试样

1）试样应符合图 6-24 的形状和尺寸。试样的粘接长度是 12.5mm ± 0.5mm。金属

片的长度为 100.0mm ±0.2mm，宽度为 25.0mm ±0.2mm，厚度为 2.0mm ±0.1mm。橡胶片的长度为 12.5mm ±0.5mm，宽度为 25.0mm ±0.2mm，厚度为 2.0mm ±0.1mm。同一试样中橡胶厚度的波动不超过 0.1mm。

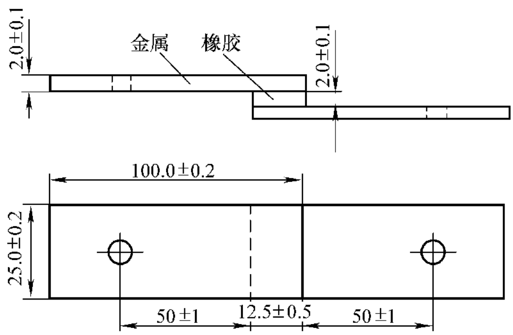



图 6-24 试样形状和尺寸

2）橡胶与金属可以是经过硫化粘接，也可以是已硫化橡胶采用粘接剂粘接。

3）试样表面应平整，不应有弯曲、挠曲、歪斜等变形。金属片应无毛刺，边缘保持直角。

4）粘接时金属片的表面处理、粘接剂配比、涂胶量、涂胶次数、晾置时间等粘接工艺及橡胶牌号、硫化温度、压力、时间等均按产品标准中有关规定进行。

5）制备试样时应在标准环境下或按产品标准有关规定进行，并应防止灰尘、水汽和其他杂质沾污粘接表面。

6）制备试样应使用夹具，以保证试样正确地粘接。粘接面的错位应不大于 0.2mm。试样粘接面的溢胶应小心清除，不要损伤粘接面。

7）硫化试样出模时应小心，避免粘接面受到过分应力作用。

## 6.7.2 试验设备

1）拉伸试验机的选用应符合橡胶塑料拉伸试验机有关标准的规定。

2）拉伸试验机应配备试样受力后自动调心装置，使加载力方向与试样中心线保持一致。

3）测量试样粘接面长度和宽度的量具精度不低于 0.05mm。

## 6.7.3 试验内容及结果表示

1）试验应在温度为 23℃ ±2℃ 的环境中进行。仲裁试验或对湿度敏感的粘接剂应在温度为 23℃ ±2 ℃、相对湿度为 60% ~70% 的环境中进行。

2）用量具测量试样粘接面的长度和宽度，精确到 0.05mm。

3）把试样夹在拉伸试验机的上、下夹持器中，起动试验机使夹持器以 50mm/min ±5mm/min 的速度对试样加载，直至橡胶与金属的粘接完全破坏。记录试样破坏的最大载荷和粘接面的破坏类型。

4）硫化橡胶与金属粘接的拉伸剪切强度按下式计算：

$$\tau = \frac{F}{Lw}$$

式中　$\tau$——硫化橡胶与金属粘接的剪切强度，单位为 MPa；

$F$——试样剪切破坏的最大载荷，单位为 N；

$L$——试样粘接面长度，单位为 mm；

$w$——试样粘接面宽度，单位为 mm。

注：试样有两个粘接面，以较小的一个粘接面计算剪切强度。

5）试样破坏类型用下列符号表示：①R，表示橡胶破坏；②RC，表示橡胶与粘接剂间破坏；③CP，表示粘接剂内聚破坏；④M，表示粘接剂与金属间破坏。

# 第 7 章　材料压缩性能测定试验

## 7.1　金属材料压缩性能试验

压缩性能是指材料在压缩应力作用下抗变形和抗破坏的能力。

压缩试验是对试样施加轴向压力，在其变形和断裂过程中测定材料的强度和塑性。实际上，压缩与拉伸仅仅是受力方向相反。因此，金属拉伸试验时所定义的力学性能指标和相应的计算公式，在压缩试验中基本上都能适用。但两者之间也存在差别，与拉伸试验相比，压缩试验有如下特点：

1）单向压缩的应力状态软性系数 $\alpha=2$。因此，压缩试验通常适用于脆性材料和低塑性材料，以显示其在静拉伸、扭转和弯曲试验时所不能反映的材料在韧性状态下的力学行为。对脆性更大的材料，为了更充分地显示材料的微小塑性差异，可采用应力状态软性系数 $\alpha>2$ 的多向压缩试验。

2）塑性较好的金属材料（如退火钢、黄铜等）只能被压扁，一般不会被破坏，其压缩曲线如图 7-1 所示。

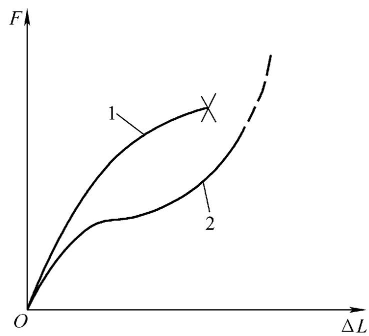


图 7-1　金属压缩曲线

1—脆性材料　2—塑性材料

3）脆性材料压缩破坏的形式有剪坏和拉坏两种。剪坏的断裂面与底面约呈 45°角，拉坏是由于试样的纤维组织与压缩应力方向一致，压缩试验时试样横截面积增加，而横向纤维伸长超过一定限度而破断。

4）压缩试验时，试样端面存在很大的摩擦力，这将阻碍试样端面的横向变形（使试样呈腰鼓状），影响试验结果的准确性。试样高度与直径之比（$L/d$）越小，其端面摩擦力对试验结果的影响越大。为了减小试样端面摩擦力的影响，可增加 $L/d$ 的比值，但也不宜过大，以免引起纵向失稳。

金属材料压缩性能试验按照 GB/T 7314—2005《金属材料　室温压缩试验方法》进行。

### 7.1.1　试样

**1. 试样的一般要求**

1）试样形状与尺寸的设计应保证在试验过程中标距内为均匀单向压缩，引伸计所测变形应与试样轴线上标距段的变形相等，端部不应在试验结束之前损坏。

2）切取样坯和机加工试样时，应防止因冷加工或热影响而改变材料的性能。

3）板状试样厚度为原材料厚度时，应保留原表面，表面上不应有划痕等损伤。试样厚度为机加工厚度时，表面粗糙度应不劣于原表面粗糙度。厚度（或直径）在标距内的允许偏差为1%或0.05mm时，取其较小值。

4）试样应平直，从板卷或带卷上切取的试样，允许带有不影响性能测定的轻微弯曲。

5）试样原始标距不应小于试样直径（或宽度）的1/2。

**2. 侧向无约束试样**

侧向无约束试样包括圆柱体试样和正方形柱体试样，如图7-2和图7-3所示。

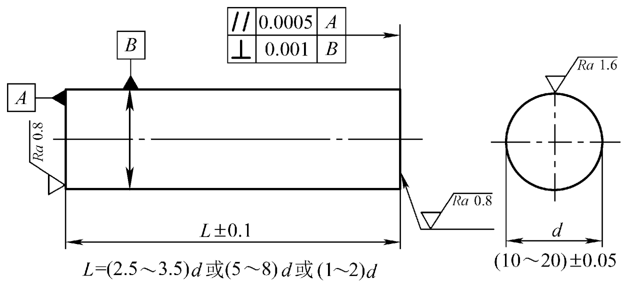



图7-2　圆柱体试样

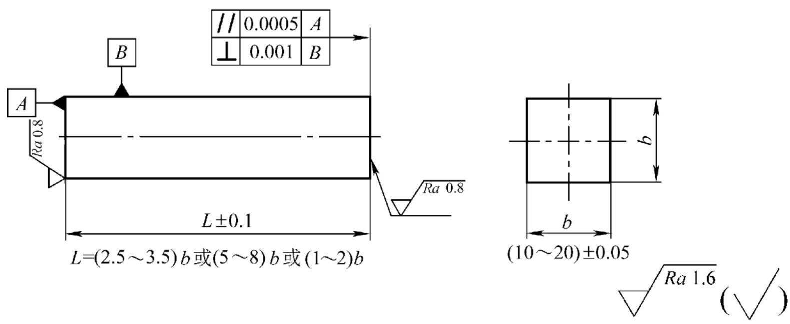



图7-3　正方形柱体试样

1）长度是直径（或宽度）1～2倍的试样适用于测定抗压强度 $R_{mc}$（对于脆性材料，试样压至破坏过程中的最大压缩应力，对于在压缩中不以粉碎性破裂而失效的塑性材料，则抗压强度取决于规定应变和试样几何形状）。

2）长度是直径（或宽度）2.5～3.5倍的试样适用于：①测定规定非比例压缩强度 $R_{pc}$（试样标距段的非比例压缩变形达到规定的原始标距百分比时的压缩应力，表示此压缩强度的符号应以下角标说明，例如 $R_{pc0.1}$ 表示规定非比例压缩应变为0.1%时的压缩应力）；②规定总压缩强度 $R_{tc}$（试样标距段的总压缩变形（弹性变形加塑性变形）达到规定的原始标距百分比时的压缩应力，表示此压缩强度的符号应附以下角标说明，例如 $R_{tc2}$ 表示规定总压缩应变为2%时的压缩应力）；③下压缩屈服强度 $R_{eLc}$（屈服期间不计初始瞬时效应时的最低压缩应力）；④上压缩屈服强度 $R_{eHc}$（试样发生屈服而力首次下降前的最高压缩应力）；⑤抗压强度 $R_{mc}$。

3）长度是直径（或宽度）5～8 倍的试样适用于测定 $R_{pc0.01}$ 和压缩杨氏模量 $E_c$（试验过程中，轴向压缩应力与轴向应变成线性比例关系范围内的轴向压缩应力与轴向应变的比值）。

**3. 板状试样**

1）板状试样包括矩形板试样和带凸耳板状试样，如图 7-4 和图 7-5 所示，试验时需夹持在约束装置内进行试验。

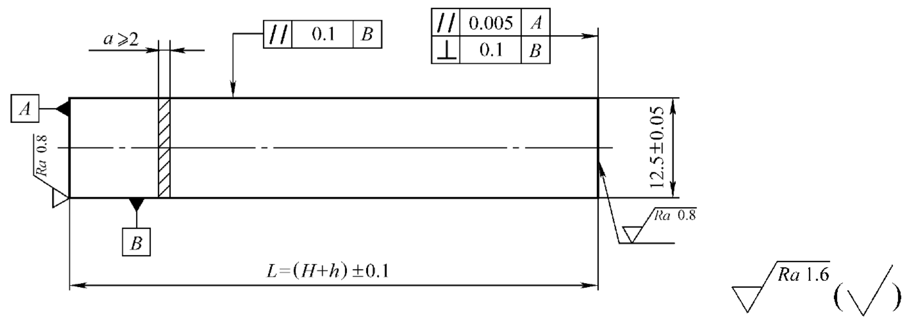



图 7-4　矩形板试样

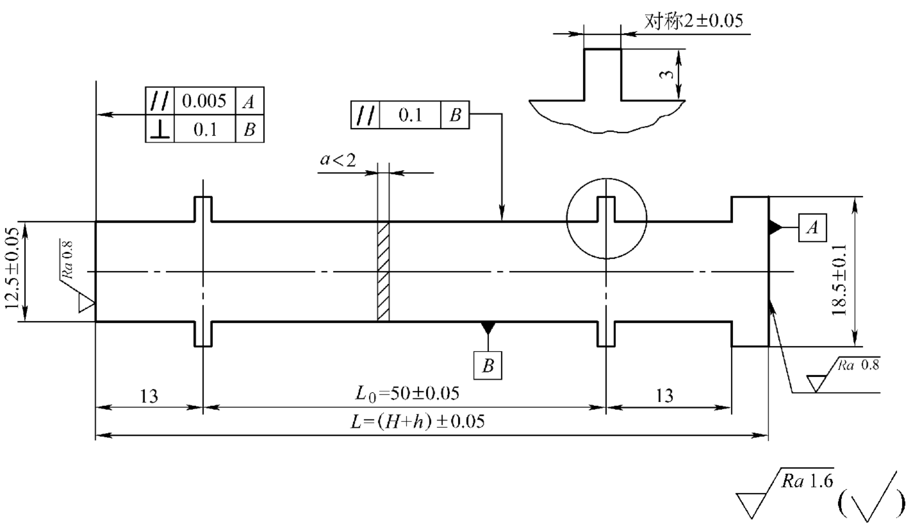



图 7-5　带凸耳板状试样

2）板状试样的形状和尺寸如表 7-1 所示。

**表 7-1　板状试样的形状和尺寸**　（单位：mm）

| 厚　度 | 宽　度 |
|---|---|
| 0.1～<2 | 12.5 |
| 2～<10 | 12.5 |
| ≥10 | ≥10 |

注：厚度小于 0.3mm 的试样，一般把头部弯成“⊓”形。

**4. 试样尺寸测量**

1）板状及正方形柱体试样厚度和宽度，须在试样原始标距中点处测量；圆柱体试样须在原始标距中点处两个相互垂直的方向上测量直径，取其算术平均值。

2）测量带凸耳板状试样时，原始标距为两侧面的每一侧面两凸耳沿试样轴线方向的内侧距离和外侧距离总和的 1/4。测量时量具不应靠近凸耳根部。

3）量具或测量装置按表 7-2 选用，根据需测量的试样的原始尺寸计算原始横截面积，至少保留 4 位有效数字。

**表 7-2 量具或测量装置的分辨力** （单位：mm）

| 试样横截面尺寸 | 分辨力≤ | 试样横截面尺寸 | 分辨力≤ |
|---|---|---|---|
| 0.1～0.5 | 0.001 | >2.0～10 | 0.01 |
| >0.5～2.0 | 0.002 | >10 | 0.05 |

## 7.1.2 试验设备

**1. 压缩试验机**

1）试验机准确度应为 1 级或优于 1 级，并应按照 GB/T 16825.1—2008《静力单轴试验机的检验 第 1 部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准》进行检验。

2）试验机上、下压板的工作表面应平行，平行度误差不大于 0.0002mm/mm（安装试样区 100mm 范围内）。试验过程中，压头与压板间不应有侧向的相对位移或转动，压板的硬度应不低于 55 HRC。

3）硬度较高的试样两端应垫以合适的硬质材料做成的垫板，试验后，板面不应有永久变形。垫板上下两端面的平行度误差应不大于 0.0002mm/mm，表面粗糙度 *Ra* 的最大值为 0.8μm。

**2. 力导向装置**

为了保证试验机垂直施加试验力，应加配力导向装置，如图 7-6 所示。

**3. 调平垫块**

试验时，如果出现偏心压缩现象，可配用调平垫块，如图 7-7 所示。

**4. 约束装置**

板状试样压缩试验，应使用约束装置。约束装置应使试样在低于规定的力作用下不发生屈曲，不影响试样轴向自由收缩及沿宽度和厚度方向的自由胀大，试验过程摩擦力为一个定值。常用约束装置如图 7-8 所示。

**5. 防护罩**

进行脆性材料试验时，应用有机玻璃或铁纱做成防护罩，将试样罩在里面，防止试样碎片飞出伤人或损坏仪器。

**6. 引伸计**

1）引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160—2002《单轴试验用引伸计的标定》的要求。测定压缩弹性模量应使用不低于 0.5 级准确度的引伸计。测定规定非比例压缩强度、规定总压缩强度、上压缩屈服强度和下压缩屈服强度，应使用不低于 1 级准确度的引伸计。

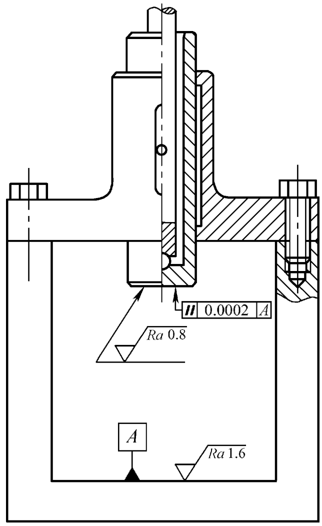



图 7-6　力导向装置

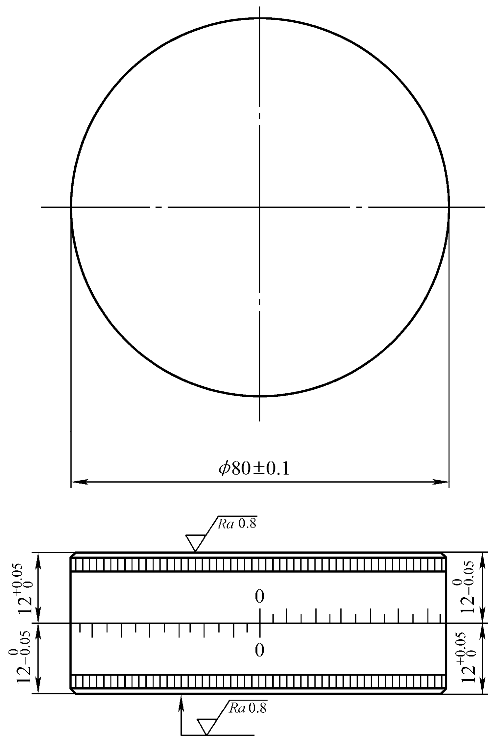



图 7-7　调平垫块

2）测定压缩弹性模量和规定非比例压缩应变小于 0.05% 的规定非比例压缩强度时，应采用平均引伸计。

## 7.1.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在 10 ~ 35℃ 范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为 23℃ ±5℃。

2）板材试样装进约束装置前，两侧面与夹板间应铺一层厚度不大于 0.05mm 的聚四氟乙烯薄膜，或均匀涂一层润滑剂，如小于 70μm 的石墨粉调以适量的精密仪表油的润滑剂，以减小摩擦。

3）板状试样铺薄膜或涂润滑剂之前，应用无腐蚀的溶剂清洗。装夹后，应把两端面用细纱布擦干净。

4）安装试样时，试样纵轴中心线应与压头轴线重合。

5）在弹性（或接近弹性）范围内，采用控制应力速率的方法，其应力速率控制在 1 ~10MPa/s 范围内。在明显塑性变形范围内，采用控制应变速率的方法，其应变速率控制在 0.00005 ~0.0001/s 范围内。对于无应变调速装置的试验机，应保持恒定的夹头速度，以便得到从加力开始至试验结束所要求的平均应变速率。

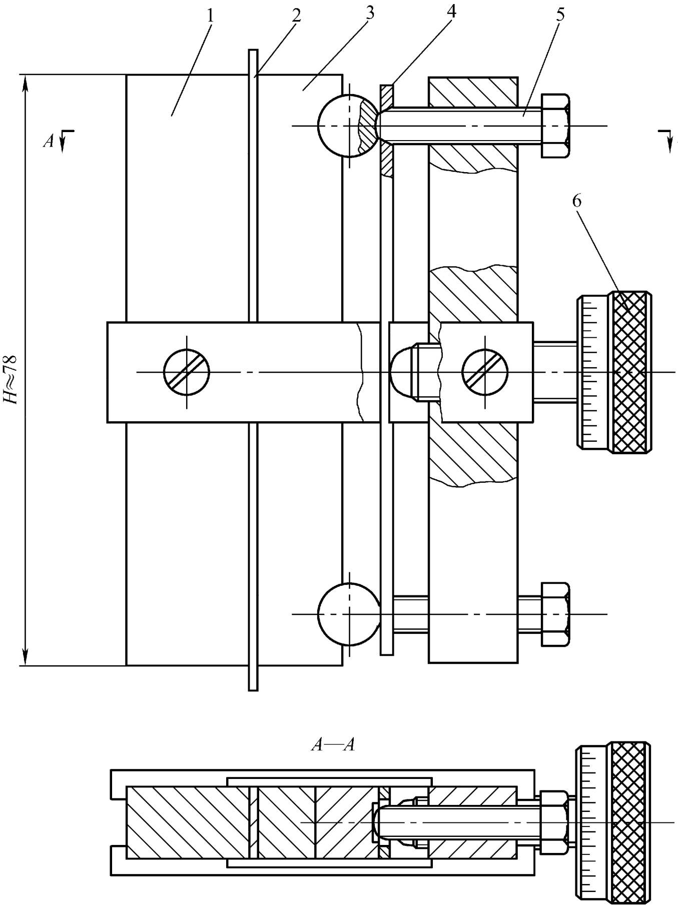



图 7-8　约束装置

1—夹板　2—试样　3—夹板　4—板簧　5—限位螺钉　6—夹紧螺钉

**2. 板状试样夹紧力的选择**

根据材料的规定非比例压缩强度 $R_{pc0.2}$（或下压缩屈服强度）及板材厚度来选择夹紧力。一般使摩擦力 $F_f$ 不大于 $F_{pc0.2}$估计值的 2%。对极薄试样（厚度小于 0.3mm 的试样为极薄试样），允许摩擦力达到 $F_{pc0.2}$估计值的 5%。在保证试验正常进行的条件下，夹紧力应尽可能小。

**3. 板状试样实际压缩力的测定**

试验时自动绘制的力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线，一般初始部分因受摩擦力影响而并非线性关系，如图 7-9 所示。当力足够大时，摩擦力达到一个定值，此后摩擦力不再进一步影响力-变形曲线。设摩擦力平均分布在试样表面上，则实际压缩力 $F$ 可用下式计算：

$$F = F_0 - \frac{1}{2}F_f$$

式中　$F$——实际压缩力，单位为 N；

$F_0$——试样上端所受的力，单位为 N；

$F_f$——摩擦力，单位为 N。

在自动绘制的力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线图上，沿弹性直线段，反延直线交原横坐标轴于 $O''$，在原横坐标轴原点 $O'$ 与 $O''$ 的连线中点上，作垂线交反延的直线于 $O$ 点，$O$ 点即为力-变形曲线的真实原点。过 $O$ 点作平行原坐标轴的直线，即为修正后的坐标轴，实际压缩力可在新坐标系上直接判读，如图 7-9 所示。

**4. 规定非比例压缩强度的测定**

（1）图解法　图解法的步骤如下：

1）先用力-变形（$F$-$\Delta L$）图解法测定规定非比例压缩力，如图 7-10 所示。力轴的比例应使所求 $F_{pc}$ 点位于力轴的 1/2 以上，变形放大倍数的选择应保证图 7-10 中的 $OC$ 段长度不小于 5mm。

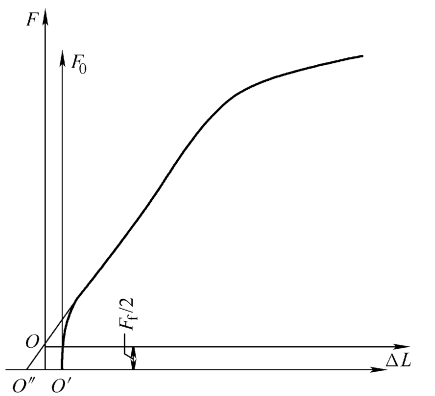



图 7-9　图解法确定实际压缩力

$F$—实际压缩力（N）

$F_0$—试样上端所受的力（N）

$F_f$—摩擦力（N）

$\Delta L$—原始标距段受力后的变形（mm）

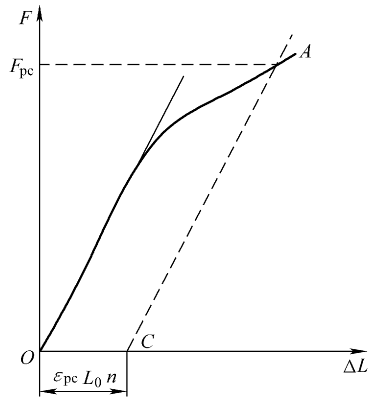



图 7-10　图解法求 $F_{pc}$

$F$—实际压缩力（N）

$\Delta L$—原始标距段受力后的变形（mm）

$\varepsilon_{pc}$—规定非比例压缩应变（%）

$L_0$—试样原始标距（mm）　$n$—变形放大倍数

2）在自动绘制的力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线图上，自 $O$ 点起，截取一段相当于规定非比例变形的距离 $OC$（$\varepsilon_{pc}L_0n$），过 $C$ 点做平行于弹性直线段的直线 $CA$ 交曲线于 $A$ 点，其对应的力 $F_{pc}$ 为所测规定非比例压缩力。规定非比例压缩强度按下式计算：

$$R_{pc}=\frac{F_{pc}}{S_0}$$

式中　$R_{pc}$——规定非比例压缩强度，单位为 MPa；

$F_{pc}$——规定非比例压缩变形的实际压缩力，单位为 N；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

（2）逐步逼近法　逐步逼近法的步骤如下：

1）如果力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线无明显的弹性直线段，采用逐步逼近法。

2）先在曲线上直观估读一点 $A_0$，约为规定非比例压缩应变 0.2% 的力 $F_{A0}$，而后在微弯曲线上取 $G_0$、$Q_0$ 两点，其分别对应的力为 0.1 $F_{A0}$、0.5 $F_{A0}$，做直线 $G_0Q_0$，过 $C$

点做平行于 $G_0Q_0$ 的直线 $CA_1$ 交曲线于 $A_1$ 点，如 $A_1$ 点与 $A_0$ 点重合，则 $F_{A0}$即为 $F_{pc}$，如图 7-11 所示。$G_0Q_0$ 直线的斜率一般可以用于图解确定其他规定非比例压缩强度的基准。

3）如 $A_1$ 点未与 $A_0$ 点重合，需要按照上述步骤进行进一步逼近。此时，取 $A_1$ 点对应的力 $F_{A1}$来分别确定 $0.1F_{A1}$、$0.5F_{A1}$对应的点 $G_1$、$Q_1$，然后如前述过 $C$ 点做平行线来确定交点 $A_2$，重复相同步骤直至最后一次得到的交点与前一次的重合。

**5. 规定总压缩强度的测定**

1）总压缩变形一般应超过变形轴的 1/2 以上。

2）在自动绘制的力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线图上，自 $O$ 点起在变形轴上取 $OD$ 段（$\varepsilon_{tc}L_0n$），过 $D$ 点做与力轴平行的 $DM$ 直线交曲线于 $M$ 点，其对应的力 $F_{tc}$为所测规定总压缩力，如图 7-12 所示。

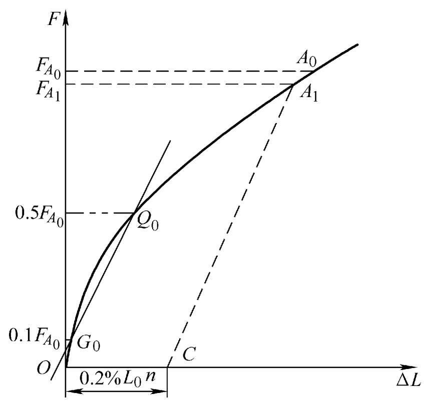



图 7-11　逐步逼近法求 $F_{pc}$

$F$—实际压缩力（N）

$\Delta L$—原始标距段受力后的变形（mm）

$L_0$—试样原始标距（mm）　$n$—变形放大倍数

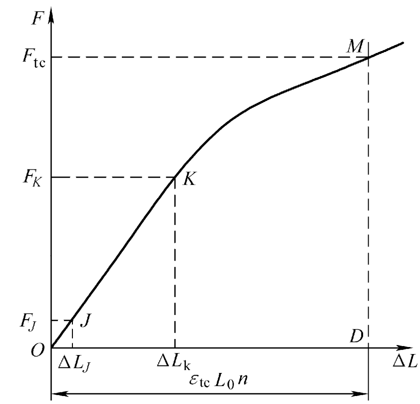



图 7-12　图解法求 $F_{tc}$

$F$—实际压缩力（N）

$\Delta L$—原始标距段受力后的变形（mm）

$\varepsilon_{tc}$—规定总压缩应变（%）

$L_0$—试样原始标距（mm）　$n$—变形放大倍数

3）规定总压缩强度按下式计算：

$$R_{tc} = \frac{F_{tc}}{S_0}$$

式中　$R_{tc}$——规定总压缩强度，单位为 MPa；

$F_{tc}$——规定总压缩变形的实际压缩力，单位为 N；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

**6. 上压缩屈服强度和下压缩屈服强度的测定**

1）呈现明显屈服（不连续屈服）现象的金属材料，一般需规定测定上压缩屈服强度或下压缩屈服强度或两者均作测定。如未具体规定，仅测定下压缩屈服强度。

2）在自动绘制的力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线图上（见图 7-13），判读力首次下降前的最高实际压缩力（$F_{eHc}$）、不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最低实际压缩力或屈服平

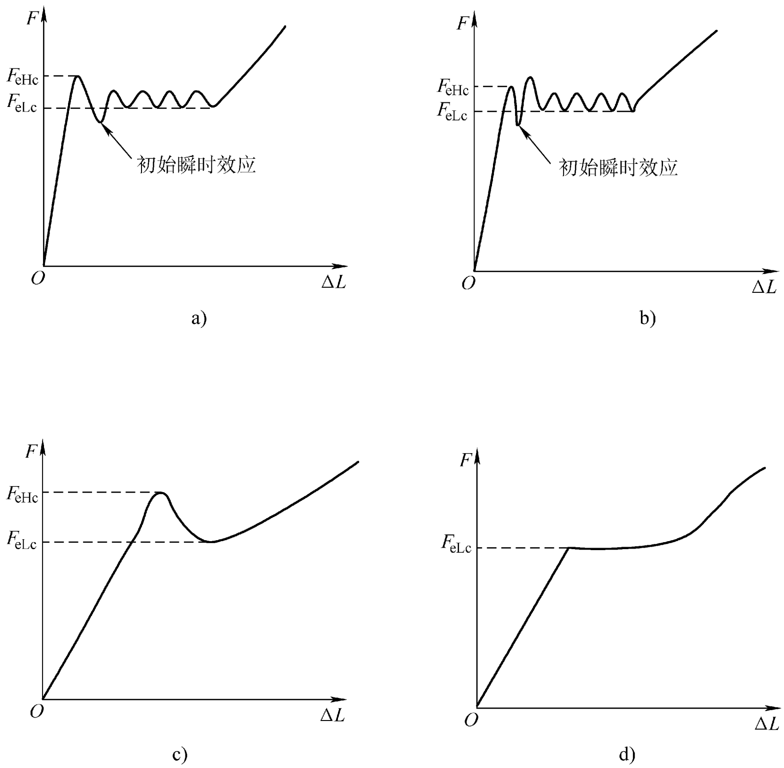



图 7-13　图解法求 $F_{eHc}$ 和 $F_{eLc}$

a）第一种屈服形式　b）第二种屈服形式　c）第三种屈服形式　d）第四种屈服形式

$F_{eHc}$—屈服时的实际上屈服压缩力（N）　$F_{eLc}$—屈服时的实际下屈服压缩力（N）

$\Delta L$—原始标距段受力后的变形（mm）

台的恒定实际压缩力（$F_{eLc}$）。

3）上压缩屈服强度和下压缩屈服强度分别按下式计算：

$$R_{eHc}=\frac{F_{eHc}}{S_0}$$

$$R_{eLc}=\frac{F_{eLc}}{S_0}$$

式中　$R_{eHc}$——上压缩屈服强度，单位为 MPa；

$F_{eHc}$——屈服时的实际上屈服压缩力，单位为 N；

$R_{eLc}$——下压缩屈服强度，单位为 MPa；

$F_{eLc}$——屈服时的实际下屈服压缩力，单位为 N；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

**7. 抗压强度的测定**

1）试样压至破坏，从力-变形（$F$-$\Delta L$）图上确定最大实际压缩力 $F_{mc}$（见图 7-14），或从测力度盘读取最大力值。

2）抗压强度按下式计算：

$$R_{mc}=\frac{F_{mc}}{S_0}$$

式中　$R_{mc}$——脆性材料的抗压强度或塑性材料的规定应变条件下的压缩应力，单位为 MPa；

$F_{mc}$——脆性材料试样压至破坏过程中的最大实际压缩力或塑性材料规定应变条件下的压缩力，单位为 N；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

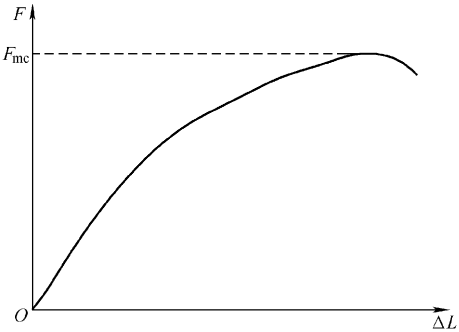



图 7-14　图解法求 $R_{mc}$

$\Delta L$—原始标距段受力后的变形（mm）

$F_{mc}$—脆性材料试样压至破坏过程中的最大实际压缩力或塑性材料规定应变条件下的压缩力（N）

3）对于塑性材料，根据应力-应变曲线在规定应变下，测定其抗压强度，在报告中应指明所测应力处的应变。

**8. 压缩弹性模量的测定**

1）在自动绘制的力-变形（$F$-$\Delta L$）曲线图上，取弹性直线段上 $J$、$K$ 两点（点距应尽可能长），读出对应的力 $F_J$、$F_K$，变形 $\Delta L_J$、$\Delta L_K$。

2）压缩弹性模量按下式计算：

$$E_c=\frac{(F_K-F_J)L_0}{(\Delta L_K-\Delta L_J)S_0}$$

式中　$E_c$——压缩弹性模量，单位为 MPa；

$L_0$——试样原始标距，单位为 mm；

$S_0$——试样原始横截面积，单位为 $mm^2$。

3）如材料无明显的弹性直线段，在无其他规定时，可用逐步逼近法求解。

**9. 压缩性能测定结果数值的修约**

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如未规定具体要求，测得的强度性能结果应按照表 7-3 的要求进行修约。弹性模量测定结果保留 3 位有效数字，修约的方法按照 GB/T 8170—2008《数值修约规则与极限数值的表示和判定》。

**表 7-3　强度性能结果数值的修约间隔**　　（单位：MPa）

| 性　　能 | 范　　围 | 修约间隔 |
|---|---|---|
| $R_{pc}$、$R_{tc}$、$R_{eHc}$、$R_{eLc}$、$R_{mc}$ | ≤200 | 1 |
| | >200～1000 | 5 |
| | >1000 | 10 |

**10. 压缩试样的破坏形式**

压缩试验时，试样的破坏形式与材料的性质及端面的支承情况有关。对于塑性材料，在试验过程中仅作侧向扩张，即高度降低，断面扩大，形成一鼓形或圆板状。对于脆性材料（如铸铁、高碳钢等材料），在压缩时，由于端面存在很大摩擦力，这种摩擦

力阻碍试样端面的横向变形，出现上下两端面小而中间凸的腰鼓形。图 7-15 所示为脆性材料端面摩擦力对压缩破坏的影响。压缩试验时，要设法减少端面摩擦的影响，以得到稳定的试验结果。为此，要求试样压头和端面加工表面粗糙度值要小，试验时端面涂以润滑脂，还可以采用端面上带有蓄油槽的试样。

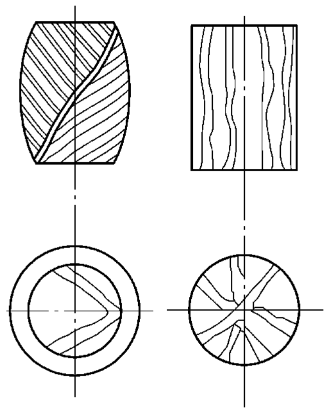



图 7-15　脆性材料端面摩擦力对压缩破坏的影响
a）有端面摩擦　b）无端面摩擦

## 7.2　金属轴承材料压缩试验

金属轴承材料压缩试验按照 GB/T 16748—1997《滑动轴承　金属轴承材料的压缩试验》进行。

### 7.2.1　试样

1）试样为圆柱形，试样的高度 $h_0$ 与直径 $d_0$ 之比为 1。

2）优先采用直径为 20mm 的试样。试样应经机加工。

3）试样的端面应精抛或精磨。两端面应相互平行并与试样的轴线垂直。成形表面应精抛或精磨。

4）试样的几何精度要求如图 7-16 所示。

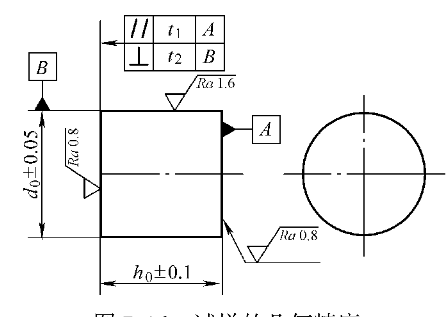



图 7-16　试样的几何精度

### 7.2.2　试验设备

1）试验在压缩试验机或其他压力加载机构上进行。

2）压板工作表面应平整并磨光，压板硬度不低于 55HRC。

3）长度差可通过测量试样本身或两压板间距离获得，获得长度差的方法应在试验

报告中注明。

### 7.2.3 试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）压缩试验开始前，测量试样的高度 $h_0$ 和直径 $d_0$，应精确到 0.1mm。

2）将试样放在压缩试验机或压力加载机构的中心位置。如果可能，试样的轴线与所施力的作用线间的距离应不大于 0.5mm。

3）每次压缩试验前，两压板应涂少许润滑脂，如凡士林。

4）试验在室温（10～30℃）下进行。

**2. 抗压强度的测定**

以最大不超过 30N/(mm² · s）的应力增量对试样连续加载，直至试样断裂或出现第一个裂纹或达到给定的总压缩应变 $\varepsilon_{dt}$。测量所需的力，并按下式计算抗压强度：

$$\sigma_{dB} = \frac{F_B}{S_0}$$

$$\sigma_{d50} = \frac{F_{50}}{S_0}$$

式中 $\sigma_{dB}$——抗压强度，单位为 MPa；

$\sigma_{d50}$——总压缩应变为 50% 时的抗压强度，单位为 MPa；

$F_B$——出现第一个裂纹或断裂时所测得的力，单位为 N；

$F_{50}$——总压缩应变为 50% 时测得的力，单位为 N；

$S_0$——原始横截面积，单位为 $mm^2$。

**3. 采用固定测量装置测量长度差法确定压缩极限**

在压缩试验过程中，要求用固定在试样或压板上的测量装置连续测量试样的长度差（例如确定 0.2% 压缩极限）。以最大不超过 30N/($mm^2$ · s）的应力增量对试样连续加载，直至达到所要确定的压缩极限相对应的非比例长度差，然后移去测量装置，再以最大不超过 30N/($mm^2$ · s）的应力增量对试样连续加载，直至试样断裂或出现第一个裂纹或达到给定的总压缩应变 $\varepsilon_{dt}$。

测量装置应能测定在所要求的压缩极限下，相对应的压缩变形的非比例长度差。非比例长度差的测量应精确到 0.01mm 或 10%，取其中较大者。

根据压缩应力-应变曲线，确定所要求的压缩极限对应的非比例压缩应变的应力。例如确定 0.2% 压缩极限：在压缩应力-应变曲线上距 0.2% 压缩应变处，做一条胡克直线的平行线，与压缩应力-应变曲线相交点的纵坐标，即是所要求的 0.2% 压缩极限，如图 7-17 所示。

如果压缩应力-应变曲线是由单个测量点绘制的，那么至少要有 10 个点大致均匀分布在应力范围内。

如果在压缩应力-应变曲线上的胡克直线太短，以至不能准确地绘制出与它平行的直线，则应在达到压缩极限后，将试样卸载，然后再加载。绘制出平行于滞后环中心线的直线，如图 7-18 所示。在试验报告中应注明是采用这种方法确定的压缩极限。

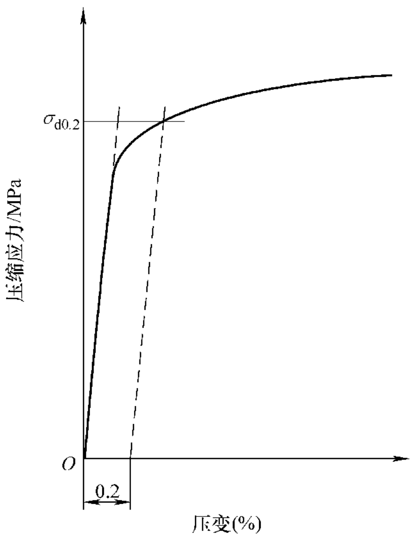



图 7-17　用 0.2% 压缩应变处胡克直线的行线确定 0.2% 压缩极限 $\sigma_{d0.2}$ 的示意图

$\sigma_{d0.2}$—对应于 0.2% 非比例或残余压缩应变的压缩极限

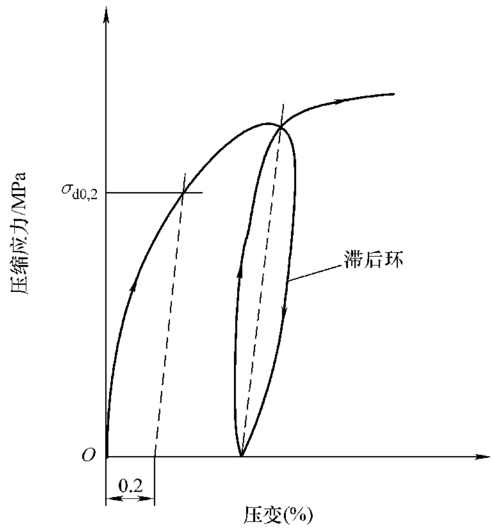



图 7-18　用 0.2% 压缩应变处滞后环中心线的平行线确定 0.2% 压缩极限 $\sigma_{d0.2}$ 的示意图

$\sigma_{d0.2}$—对应于 0.2% 非比例或残余压缩应变的压缩极限

**4. 采用逐级施力法确定压缩极限**

对试样逐级施加压力，加力时间为 30s。卸载后或卸至预载荷时，测量残余长度差。根据这些测量值绘制出压缩应力-应变曲线，从这条曲线上求得相应的压缩极限。

用如下方法测量残余长度差：

1）卸载后，从压缩试验机上取出试样，测量试样高度变化。

2）采用固定在试样或压板上的测量装置，在卸载至预载荷时测量长度差。

长度差测量装置的精度应在 0.01mm 以内。

## 7.3　塑料压缩试验

塑料压缩试验按照 GB/T 1041—2008《塑料　压缩性能的测定》进行。

### 7.3.1　试样

**1. 材料**

1）硬质和半硬质热塑性模塑和挤塑材料，包括用短纤维、小条、小片或颗粒填充的增强复合材料，以及未填充的复合材料或半硬质的热塑性片材。

2）硬质或半硬质的热固性模塑材料，包括填充或增强的复合材料、硬质或半硬质的热固性片材。

3）热致液晶聚合物。

**2. 形状和尺寸**

1）试样应为棱柱、圆柱或管状。试样的尺寸应满足下面的不等式：

$$\varepsilon_c^* \leqslant 0.4\frac{x^2}{l^2}$$

式中　$\varepsilon_c^*$——试验时发生的最大压缩标称应变，以比值表示；

$x$——取决于试样的形状，圆柱的直径、管的外径或棱柱的厚度（横截面积的最小侧），单位为 mm；

$l$——平行于压缩力轴测量试样厚度，单位为 mm。

通常进行压缩试验时，推荐的比值 $x/l>0.4$，这相应于约 6% 的最大压缩应变。为了测量压缩模量 $E_c$（应力差与对应的应变差之比），推荐的比值 $x/l>0.08$。

上述公式是基于被试材料的应力-应变行为是线性的而得出的。随着材料韧性和压缩应变的增加应选择 $\varepsilon_c^*$ 值高于最大应变的 2～3 倍。

2）优选试样的尺寸如表 7-4 所示。尺寸不够或受试产品几何形状的制约而不能使用优选试样时，可利用表 7-5 所示的两种小试样。

**表 7-4　优选类型和试样尺寸**　　（单位：mm）

| 类　型 | 测　量 | 长　度　$l$ | 宽　度　$b$ | 厚　度　$h$ |
|---|---|---|---|---|
| A | 模量 | 50 ±2 | 10 ±0.2 | 4 ±0.2 |
| B | 强度 | 10 ±0.2 | | |

**表 7-5　小试样的标称尺寸**　　（单位：mm）

| 尺　　寸 | 1 型 | 2 型 |
|---|---|---|
| 厚度 | 3 | 3 |
| 宽度 | 5 | 5 |
| 长度 | 6 | 35 |

注：2 型试样仅应用于作压缩模量的测定，在这种情况下，推荐使用 15mm 的标距以便于测量。

**3. 制备**

1）模塑和挤塑料则直接模塑或直接注塑。

2）片材由片材机加工而成。

3）需要进行机加工时，所有的机加工操作应仔细地进行，以产生光滑的表面。特别要注意机加工使试样的端面平整光滑、边缘锐利清晰，端面垂直于试样的纵轴，其垂直度误差在 0.025mm 以内。试样的最终表面推荐使用车床或铣床加工。

4）进行标线，如果使用光学应变仪，则在试样上加上规定长度的两条标线。这些标线距试样中央的距离应近似相等，并且应该使用准确度至少为 1% 的仪器测量两标线之间的距离。不能在试样上刻划、冲切或压印标线而导致试样损坏。应保证标线的媒质不对被试材料带来有害的影响，并保证两条平行的标线应尽可能窄细。

**4. 其他要求**

试样应无翘曲，表面和边缘无划伤、麻点、缩痕、飞边或其他会影响结果的可见缺陷。朝向压板的两个表面应平行并与纵轴成直角。

借助直尺、规尺和平板，用目视检查试样是否符合这些要求，并用螺旋测微计进行

测量。

试验前，应剔除测量或观察到一个或多个不符合上述要求的试样，或将其加工到合适的尺寸和形状。

注塑试样通常有 1°～2°的斜切角以便容易脱模，所以模塑试样的侧边一般不平行。

**5. 各向异性材料**

1）对各向异性材料进行试验时，压缩力应可能施加到这些产品（模制品、板材、管材等）使用时的相同或类似的方向上。

2）优选试样可以确定试样尺寸和产品尺寸之间的关系，如果不使用优选试样，应根据产品尺寸确定试样尺寸。试样的取向和尺寸有时对试验结果有着非常大的影响，所以应注明取向。

3）当材料在两个主要方向上显示的压缩性能有重大差别时，则应在这两个方向上进行试验。如果该材料在预定用途中不在任一主方向上而在某个特定的方向上承受压缩力，那么在该方向上进行试验。应记录试样相对主方向的取向。

**6. 试样的数目**

1）对于各向同性的材料，每一样品至少试验 5 个试样。

2）对于各向异性的材料，每一样品至少试验 10 个试样。其中 5 个与各向异性的主轴垂直，另外 5 个与之平行。

3）如果试样在某个明显的缺陷处破坏，则应废弃，并更换试样进行试验。

## 7.3.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机应符合 GB/T 17200 的规定。

2）试验机应能保持表 7-6 规定的试验速度。若采用其他速度，在速度低于 20mm/min 时，试验机的速度偏差应在 ±20% 之内；而速度大于 20mm/min 时，偏差应在 ±10% 之内。

**表 7-6　推荐的试验速度**

| 试验速度 $v$/(mm/min) | 偏差(%) | 试验速度 $v$/(mm/min) | 偏差(%) |
|---|---|---|---|
| 1 | ±20 | 10 | ±20 |
| 2 | ±20 | 20 | ±10 |
| 5 | ±20 | | |

**2. 压缩器具**

对试样施加变形负荷的两块硬化钢制压缩板应能对试样轴向加荷，与轴向偏差在 1∶1000 之内，同时通过抛光的压板表面传递负荷，这些板面的平整度在 0.025mm 以内，两板彼此平行且垂直于加荷轴。

注意需要时可使用自对中设备。

**3. 负荷指示器**

负荷指示器应配有一种能指示试样承受总压缩力的装置，该装置在规定的试验速度下基本上无惯性滞后，所指示的总值精度应至少为示值的 ±1% 以内。

使用商业化的圆形应变规系统可对由于不对中而可能产生的横向力进行补偿。

**4. 应变仪**

应变仪用于测定试样相应部分长度的变化。如果测定压缩应变 $\varepsilon$（优先研究），那么这个长度为标距；另外，对于标称压缩应变 $\varepsilon_c$，此长度即为压缩器具两个接触表面间的距离。最好能自动地记录此距离。

仪器在规定的试验速度下应该基本上无惯性滞后。为了测量模量要使用 A 型试样，其精度应至少为所用应变间距的 ±1%。作为压缩模量的测量，相当于 50mm 标距的 ±1μm及 0.2% 的应变间距。

当应变仪加配到试样上，避免给试样带来任何微小的变形或损伤，确保应变仪与试样之间也没有任何滑动。

试样也可配有纵向应变规，其精度应为所用应变间隔的至少 1%。对于模量的测量这相当于应变的精度为 $2.0\times10^{-5}$。选择所用的应变仪、试样制备方法及黏合剂应不影响试验结果。

稍不对中及试样原有的翘曲可能会使试样相对面间产生的应变不同，其结果是在低应变下产生误差。在这种情况下，可测量试样两相对面的平均应变。但在试样每一面使用应变仪单独收集的数据时，会发现试样的翘曲和弯曲远快于两相对表面的平均应变。

**5. 测量试样尺寸的装置**

（1）硬质材料　用测微计或等效的仪器测量试样厚度、宽度和长度，精确至 0.01mm。试样测量台的尺寸和形状应适宜，同时所受力不能改变试样的尺寸。

（2）半硬质材料　用带有能对试样施加 20kPa ± 3kPa 压力的平面圆形压脚测微计或等效的仪器测量试样厚度，精确至 0.01mm。

## 7.3.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

（1）试验环境　应选择 GB/T 2918 规定的标准环境之一进行试验，最好与状态调节使用的环境相同。

（2）试样尺寸的测量　沿着试样的长度测量 3 点的宽度、厚度和直径，并计算横截面积的平均值。测量每个试样的长度应准确至 1%。

（3）装样　把试样放在两压板之间，使试样中心线与两压板中心连线一致，应保证试样的两个端面与压板平。调整试验机使试样端面刚好与压板接触。

在压缩过程中，试样端面可能沿着压板滑动，其滑动的变化程度取决于试样与压板的表面结构。这将导致不同程度的桶形变形，影响所测的结果。材料的硬度越小，这种影响越明显。

更精确的测量，建议在试样各端面用适当的润滑剂以促进滑动；或者在试样和压板之间垫上细砂纸，以阻止滑动。无论采用何种方法，都应在试验报告中注明。

（4）预负荷　试验前试样基本上不应加负荷，但是为避免应力-应变曲线起始部分出现弯曲区域，这样的负荷是必需的。测量模量时，开始试验的压缩应力 $\sigma_0$（见图 7-19）应在下述范围内：

$$0 \leqslant \sigma_0 \leqslant 5 \times 10^{-4} E_c$$

相应的预应变 $\varepsilon_0 \leqslant 0.05\%$，而当测量 $\sigma_M$ 时，其应处在下式的范围内：

$$0 \leqslant \sigma_0 \leqslant 10^2 \sigma_M$$

高黏弹性、韧性材料（如聚乙烯、聚丙烯或吸潮的聚酰胺）的压缩模量明显地受预应力的影响。

（5）试验速度　按照材料规范调整试验速度 $v$（单位为 mm/min）。当没有材料规范时，调整到由表 7-6 给出的最接近以下关系式的值：

1）$v = 0.02l/\text{min}$，用于模量测定。

2）$v = 0.1l/\text{min}$，用于在屈服前破坏的材料强度测定。

3）$v = 0.5l/\text{min}$，用于有屈服的材料强度的测定。

对于优选试样，试验速度为：

1）$v = 1\text{mm/min}$（$l = 50\text{mm}$），用于模量的测量。

2）$v = 1\text{mm/min}$（$l = 10\text{mm}$），用于屈服前就破坏的材料强度测量。

3）$v = 5\text{mm/min}$（$l = 10\text{mm}$），用于具有屈服的材料的强度测量。

（6）数据的记录　在试验过程中，测定试样的力（应力）和相应的压缩量（应变），最好使用自动记录系统获得一条完整的应力-应变曲线。

**2. 结果表示**

1）典型的应力-应变曲线如图 7-20 所示。

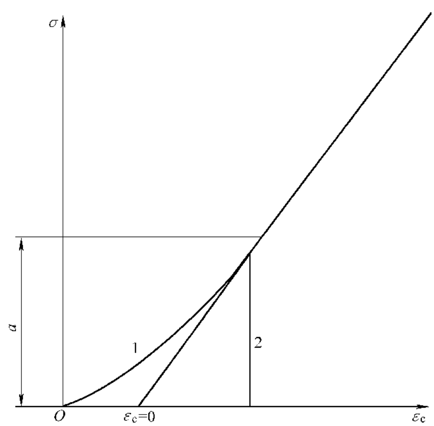



图 7-19　具有初始弯曲区域和一个阶跃的应力-应变曲线和确定零应变点的示例

1—应力-应变曲线起始部分示出的弯曲区域

2—由于只能在高于起动范围才能进行力的测量，应力-应变图起始部分示出的阶跃值

$\sigma$—压缩应力（MPa）　$\varepsilon_c$—标称压缩应变（%）　$a \leqslant 5 \times 10^{-4} E_c$

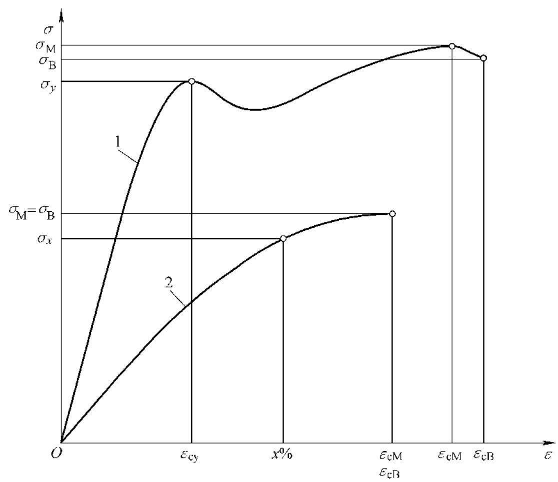



图 7-20　典型的应力-应变曲线

1—出现屈服压缩　2—无屈服压缩

$\sigma$—压缩应力（MPa）　$\sigma_M$—压缩强度（MPa）　$\sigma_B$—破坏时的压缩应力（MPa）　$\sigma_y$—屈服压缩应力（MPa）　$\sigma_x$—$x$% 应变时的压缩应力（MPa）　$\varepsilon$—压缩应变　$\varepsilon_{cy}$—标称压缩屈服应变（%）　$\varepsilon_{cM}$—压缩强度时的标称压缩应变（%）　$\varepsilon_{cB}$—破坏时的标称压缩应变（%）

2）压缩应变用下式计算：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon$——压缩应变（%）；

$\Delta L_0$——试样标距间长度的减量，单位为 mm；

$L_0$——试样的标距，单位为 mm。

3）压缩应变用下式计算：

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon_c$——标称压缩应变（%）；

$\Delta L$——压缩板间距离的减量，单位为 mm；

$L$——压缩板间的初始距离，单位为 mm。

4）压缩模量用下式计算：

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

式中　$E_c$——压缩模量，单位为 MPa；

$\sigma_1$——应变值 $\varepsilon_1 = 0.05\%$ 时测量的应力值，单位为 MPa；

$\sigma_2$——应变值 $\varepsilon_2 = 0.25\%$ 时测量的应力值，单位为 MPa。

## 7.4　纤维增强塑料压缩试验

纤维增强塑料压缩试验按照 GB/T 1448—2005《纤维增强塑料压缩性能试验方法》进行。

### 7.4.1　试样

试样的形状和尺寸如图 7-21 和表 7-7 所示。

1）Ⅰ型试样厚度 $d$ 小于 10mm 时，宽度 $b$ 取 10mm ± 0.2mm；试样厚度 $d$ 大于 10mm 时，宽度 $b$ 取厚度尺寸。

2）测定压缩强度时，$\lambda$ 取 10；若试验过程中有失稳现象，$\lambda$ 取 6。

3）测定压缩弹性模量时，$\lambda$ 取 15 或根据测量变形的仪表确定。

4）Ⅰ型试样采用机械加工法制备，Ⅱ型试样采用模塑法制备或其他成型方法制备。

5）试样上下端面要求相互平行，且与试样中心线垂直。平行度误差应小于试样高度的 0.1%。

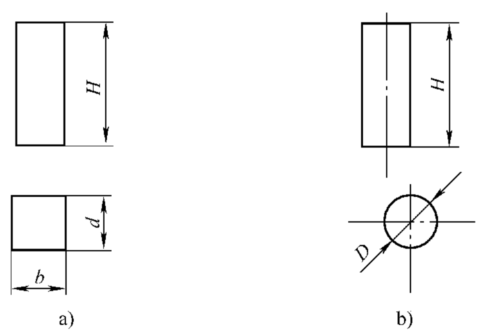



图 7-21　试样的形状
a）Ⅰ型　b）Ⅱ型

表 7-7　试样的尺寸　（单位：mm）

| 尺寸符号 | Ⅰ型 | | 尺寸符号 | Ⅱ型 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 一般试样 | 仲裁试样 | | 一般试样 | 仲裁试样 |
| 宽度 $b$ | 10 ~ 14 | 10 ± 0.2 | — | — | — |
| 厚度 $d$ | 4 ~ 14 | 10 ± 0.2 | 直径 $D$ | 4 ~ 16 | 10 ± 0.2 |
| 高度 $H$ | $\frac{\lambda}{3.46}d$ | 30 ± 0.5 | 高度 $H$ | $\frac{\lambda}{4}D$ | 25 ± 0.5 |

## 7.4.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差应不超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10% ~ 90% 范围内（尽量落在满载的一边），且应不小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 ±1%。

**2. 压头**

试验机的加载压头应平整、光滑，并具有可调整上下压板平行度的球形支座。

**3. 试验速度**

1）测定压缩强度时，加载速度为 1 ~ 6mm/min，仲裁试验速度为 2mm/min。

2）测定压缩弹性模量时，加载速度一般为 2mm/min。

## 7.4.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

以恒定速率沿试样轴向进行压缩，使试样破坏或高度减小到预定值。在整个过程中，测量施加在试样上的载荷和试样高度或应变，测定压缩应力和压缩弹性模量等。

**2. 试验步骤**

1）将合格试样编号，测量试样任意三处的宽度和厚度，取算术平均值。

2）安放试样，使试样的中心线与试验机上、下压板的中心对准。

3）加载。

4）测定压缩应力时加载直至试样破坏，记录试样的屈服载荷、破坏载荷或最大载荷及试样破坏形式。

5）测定压缩弹性模量时，在试样高度中间位置安放测量变形的仪表，施加初载（约 5% 的破坏载荷），检查并调整试样及变形测量系统，使整个系统处于正常工作状态以及使试样两侧压缩变形比较一致。

6）测定压缩弹性模量时，无自动记录装置可采用分级加载，级差为破坏载荷的

5% ~10%，至少分 5 级加载，所施加的载荷不宜超过破坏载荷的 50%。一般至少重复测定 3 次，取其两次稳定的变形增量，记录各级载荷和相应的变形值。

7）测定压缩弹性模量时，有自动记录装置，可连续加载。

8）有明显内部缺陷或端部挤压破坏的试样，应予作废。同批有效试样不足 5 个时，应重作试验。

**3. 结果表示**

1）压缩应力（压缩屈服应力、压缩断裂应力或压缩强度）按下式计算：

$$\sigma_c = \frac{F}{S}$$

Ⅰ型试样 $$S = bd$$

Ⅱ型试样 $$S = \frac{\pi}{4}D^2$$

式中 $\sigma_c$——压缩应力（压缩屈服应力、压缩断裂应力或压缩强度），单位为 MPa；

$F$——屈服载荷、破坏载荷或最大载荷，单位为 N；

$S$——试样横截面积，单位为 $mm^2$；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$d$——试样厚度，单位为 mm；

$D$——试样直径，单位为 mm。

2）压缩弹性模量采用分级加载时按下计算：

$$E_c = \frac{L_0 \Delta F}{bd\Delta L}$$

式中 $E_c$——压缩弹性模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——载荷-变形曲线上初始直线段的载荷增量，单位为 N；

$\Delta L$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的标距内的变形增量，单位为 mm；

$L_0$——仪表的标距，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$d$——试样厚度，单位为 mm。

## 7.5 单向纤维增强塑料平板压缩试验

单向纤维增强塑料平板压缩试验按照 GB/T 3856—2005《单向纤维增强塑料平板压缩试验方法》进行。

### 7.5.1 试样

**1. 试样尺寸**

1）试样几何形状和尺寸如图 7-22 所示。

2）试样厚度为 2 ~3mm。仲裁试样的厚度为 2mm。

3）只测泊松比时，试样工作段的长度可适当加长。

**2. 加强片及其粘接要求**

1）加强片可采用与所测试材料弹性模量相近的材料，如铝板。

2）粘合剂应采用常温固化或温度低于被测试材料成型温度的高强、柔性粘合剂，应保证在试验过程中加强片不脱落。

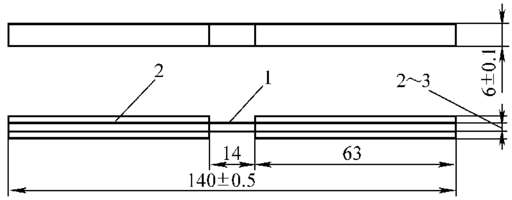



图 7-22　压缩试样

1—试样　2—加强片

3）对粘接加强片处的试样表面进行打毛和清洗处理时，不允许损伤纤维。

4）试样两侧加强片应对称。

**3. 试样数量**

每组试样数量应不少于 5 个，仲裁试验应不少于 10 个。

## 7.5.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10% ~ 90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 ±1%。

**2. 试验夹具**

试验夹具示意图及尺寸如图 7-23 和表 7-8 所示，夹具装配如图 7-24 所示。

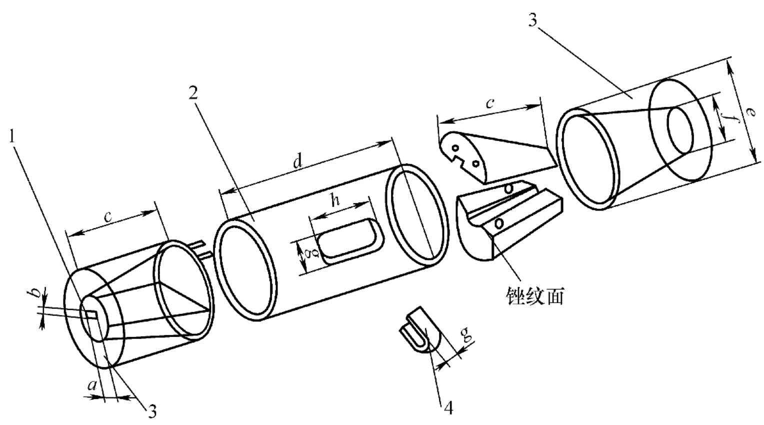



图 7-23　试验夹具示意图

1—楔块　2—套筒　3—外夹头　4—预载垫

表 7-8　试验夹具的尺寸　　（单位：mm）

| 尺寸符号 | 尺　　寸 | 尺寸符号 | 尺　　寸 |
|---|---|---|---|
| $a$ | $6^{+0.1}_{0}$ | $e$ | $69^{0}_{-0.05}$ |
| $b$ | $3^{+0.05}_{0}$ | $f$ | $33 \pm 0.03$ |
| $c$ | $64 \pm 0.1$ | $g$ | 18 |
| $d$ | $134 \pm 0.5$ | $h$ | 38 |

## 7.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）将合格的试样编号并测量工作段内任意 3 处的宽度和厚度，取算术平均值。

2）将试样装在压缩夹具里（见图 7-24）。在压缩夹具上下楔块中间放置预载垫，使两楔块之间的距离保持为 14mm。放在试验机的压板上，对准中心，加预载。

3）载荷的大小以保证夹具可靠地夹紧试样为限，并使套筒能自由移动。卸去载荷，取出预载垫。

4）加载速度为 1 ~ 2mm/min，仲裁试验时为 1mm/min。

5）测定压缩强度时，均匀、连续施加载荷，直到试样破坏，记录最大载荷值及试样破坏形式。

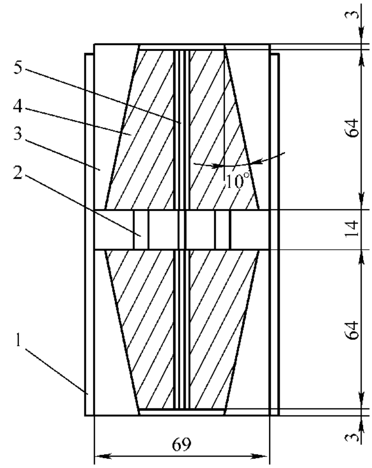



图 7-24　试验夹具装配图
1—楔块　2—套筒　3—预载垫
4—楔块　5—试样

6）测量压缩模量、泊松比及应力-应变曲线时，施加初载（约 5% 的破坏载荷），检查和调整试样及仪表，使其处于正常工作状态，然后连续加载荷，自动记录相应的应变。或采用分级加载，级差为 5% ~ 10% 的破坏载荷（测定压缩弹性模量和泊松比时，至少 5 级），记录各级载荷和相应的应变值。

7）绘制载荷-应变曲线。

8）加强片脱落、端头挤压破坏以及破坏仅发生在加强片内的试样应予作废。当同批有效试验数据不足 5 个或仲裁试验不足 10 个时，应重作试验。

**2. 结果表示**

1）压缩强度按下式计算：

$$\sigma_c = \frac{F_b}{bh}$$

式中　$\sigma_c$——压缩强度，单位为 MPa；

$F_b$——破坏载荷，单位为 N；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

2）压缩弹性模量按下式计算：

$$E_c = \frac{\Delta F}{bh\Delta\varepsilon}$$

式中　$E_c$——压缩弹性模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——载荷-变形曲线上初始直线段的载荷增量，单位为 N；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$\Delta\varepsilon$——与 $\Delta F$ 对应的应变增量。

注：荷载-应变曲线无初始直线段时，则取初始切线模量或割线模量作为弹性模量。

3）压缩泊松比按公式计算：

$$\mu_c = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

式中　$\mu_c$——压缩泊松比；

$\varepsilon_1$——应力-应变曲线初始直线段内的纵向应变；

$\varepsilon_2$——对应于 $\varepsilon_1$ 的横向应变。

## 7.6　纤维增强塑料面内压缩试验

纤维增强塑料面内压缩试验按照 GB/T 5258—2008《纤维增强塑料面内压缩性能试验方法》进行。

### 7.6.1　试样

**1. 试样形状和尺寸**

1）试样的形状如图 7-25 所示，尺寸如表 7-9 所示。

2）试样 1 为矩形截面的直条试样，必须贴加强片。

3）试样 2 为矩形截面的直条试样，必要时可以贴加强片以防止端部压坏。

4）试样 3 为矩形截面的直条试样，不贴加强片。

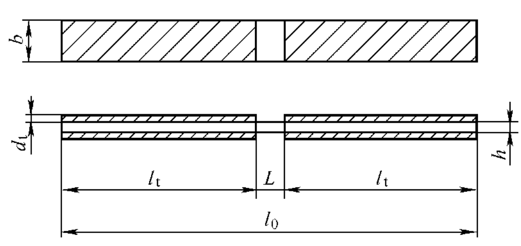



图 7-25　试样的形状

**2. 试样加工**

试样两个端面应相互平行，平行度误差应不大于 0.1% 的初始试样高度，并与试样轴线垂直，垂直度误差不大于 0.1% 的初始试样高度。对单向纤维增强塑料，试样轴线与纤维方向偏差不能超过 0.5°。

试样应无扭曲，各相对平面应平行且对称。试样表面和侧面应无刮痕、无凹坑、飞边。试样应通过目测来检查直边、平板的质量，通过测微尺来检查尺寸误差。检查有任

表 7-9　试样的尺寸　（单位：mm）

| 尺　　寸 | 符号 | 试　样　1 | 试　样　2 | 试　样　3 |
|---|---|---|---|---|
| 总长 | $l_0$ | 110 ± 1 | 110 ± 1 | 125 ± 1 |
| 厚度 | $h$ | 2 ± 0.2 | （2 ~ 10）± 0.2 | ≥4 |
| 宽度 | $b$ | 10 ± 0.5 | 10 ± 0.5 | 25 ± 0.5 |
| 加强片/夹头间距离 | $L$ | 10 | 10 | 25 |
| 加强片长度 | $l_t$ | 50 | 50（若用） | — |
| 加强片厚度 | $d_t$ | 1 | 0.5 ~ 2（若用） | — |

注：使用 C 型夹具和试样 3 进行试验时，应保证试样上端伸出夹具的长度不小于材料的最大压缩变形。

何一项不满足要求的试样即作废，或通过加工使其满足要求。

试样的端部必须加强时，加强片推荐采用 0/90°正交铺设的或玻璃纤维织物/树脂形成的材料，且加强片纤维方向与试样的轴向成 ±45°。加强片厚度为 0.5 ~ 2mm。如果在较大端部载荷下加强片发生破坏，则可把加强片角度调整为 0/90°。

加强片可用铝板，或强度和刚度均不小于推荐的加强片材料的其他适当材料。

加强片可以对单根试样单独粘贴，也可先将整块试样板材粘贴好，再切割成试样。

加强片、试样粘接面应经打磨、清洗处理，不允许损伤纤维，用室温固化或低于材料固化温度的粘合剂粘接。加强片的端头、宽度应与试样一致，确保在试验过程中加强片不脱落。加强片与试样间应粘接密实，并保证加强片相互平行且与试样中心线对称。

## 7.6.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差应不超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10% ~ 90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均应不超过 ±1%。

**2. 应变测量装置**

通过应变片或引伸仪测量应变。应变片的丝栅长度不能超过 3mm。应变显示相对误差不能超过 ±1%，要配有应变记录装置。

**3. 量具**

量具的精度至少要达到 0.01mm。

**4. 加载夹具**

（1）剪切加载方式　载荷通过加强片的剪切应力传递到被测试样，试样尺寸采用表 7-9 中的试样 1。剪切加载方式适用于高性能材料，如单向纤维增强塑料的纤维方向压缩，也可用于其他类型的纤维增强塑料。剪切加载的压缩试验用 A 型夹具如图 7-26 和图 7-27 所示。

（2）联合加载方式　载荷由端部和剪切共同施加于被测试样，试样尺寸采用表 7-9

中的试样 2。联合加载方式适用于性能较高的材料，如连续纤维织物增强塑料的较强方向。联合加载的压缩试验用 B 型夹具如图 7-28 所示。

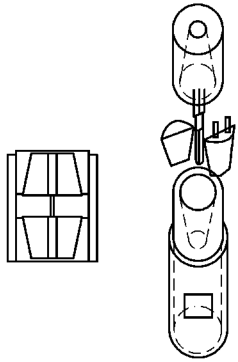


图 7-26　A1 型夹具

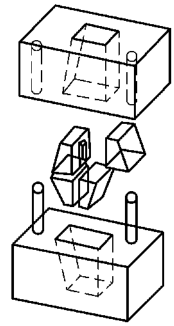


图 7-27　A2 型夹具

（3）端部加载方式　载荷直接施加在试样端部，试样尺寸采用表 7-9 中的试样 3。端部加载方式适用于低性能的材料，如毡增强塑料，或连续纤维织物增强塑料的较弱方向。端部加载的压缩试验用 C 型夹具如图 7-29 所示。

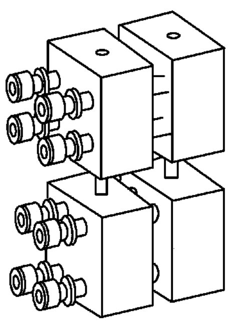


图 7-28　B 型夹具

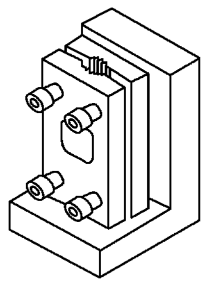


图 7-29　C 型夹具

## 7.6.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

通过能避免试样失稳、防止试样偏心和端部挤压破坏的压缩夹具对试样施加轴向载荷，使试样在工作段内压缩破坏，记录试验区的载荷和应变（或变形），即可求出需要的压缩性能。

**2. 试验步骤**

1）将合格的试样编号，并测量试验工作段任意 3 处的宽度和厚度，取算术平均值。结果精确至 0.01 mm。

2）贴好应变片或安装引伸仪，为保证弯曲不超过规定，需要在试样两面对称点上测量应变。

3）把试样装载到压缩夹具上。调整夹具和试样进行试加载，直至满足初始弹性段

两面应变读数基本一致。对于仲裁试验，应满足下式的要求：

$$\left|\frac{\varepsilon_b-\varepsilon_a}{\varepsilon_b+\varepsilon_a}\right|\leqslant 0.1$$

式中　$\varepsilon_a$、$\varepsilon_b$——同一时刻试样两面对称点测得的应变。

4）以 1mm/min ± 0.5mm/min 速度进行加载，直至破坏。

5）连续记录载荷和应变（或变形）。若无自动记录，以预估破坏载荷的 5% 为级差进行分级加载。

6）记录试验过程中出现的最大载荷。

7）检查试验的有效性。以下两种情况的试验数据应作废：①试样在夹持区内破坏，且数据低于正常破坏数据的平均值；②采用表 7-9 中的试样 3 时，试样端部出现破坏。

8）记录破坏模式，试样的破坏模式分为 A 型 ~ F 型 6 种，如图 7-30 所示。

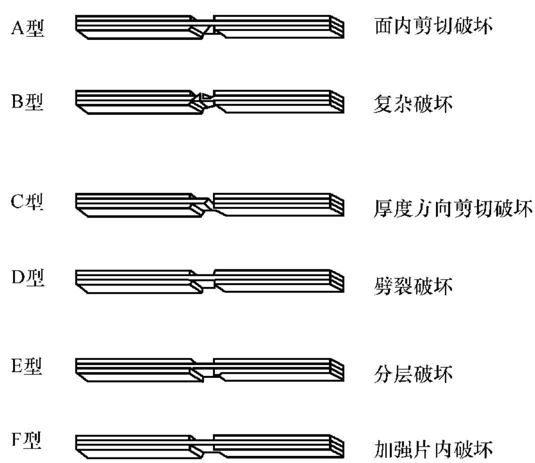



图 7-30　典型破坏模式

**3. 结果表示**

1）压缩应力按下式计算：

$$\sigma_c=\frac{F}{bh}$$

式中　$\sigma_c$——压缩载荷为 $F$ 时的压缩应力，单位为 MPa；

$F$——特定时刻的压缩载荷，单位为 N；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

2）压缩应变按下式计算：

$$\varepsilon_c=\frac{\Delta L}{L}\times 100\%$$

式中　$\varepsilon_c$——对应于 $\Delta L$ 的应变量（%）；

$\Delta L$——标距段的变形量，单位为 mm；

$L$——标距，单位为 mm。

3）当直接测量应变时，压缩弹性模量按下式计算：

$$E_c = \frac{\sigma''_c - \sigma'_c}{\varepsilon''_c - \varepsilon'_c} \times 10^{-3}$$

式中　$E_c$——压缩弹性模量，单位为 GPa；

$\varepsilon''_c$、$\varepsilon'_c$——压缩应力-应变曲线初始直线段上任意两点的应变；

$\sigma''_c$、$\sigma'_c$——对应于 $\varepsilon''_c$ 和 $\varepsilon'_c$ 的应力，单位为 MPa。

4）当直接测量的是标距段变形时，压缩弹性模量按下式计算：

$$E_c = \frac{\Delta FL}{bh\Delta L} \times 10^{-3}$$

式中　$E_c$——压缩弹性模量，单位为 GPa；

$\Delta F$——压缩载荷-位移曲线初始直线段上任意两点的载荷改变量，单位为 N；

$\Delta L$——与 $\Delta F$ 相对应的标距段变形量；

$L$——标距，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

5）当直接测量应变时，压缩割线模量按下式计算：

$$E_{cx} = \frac{F_x}{bh\varepsilon_{cx}} \times 10^{-3}$$

式中　$E_{cx}$——对应点的压缩割线模量，单位为 GPa；

$F_x$——对应于 $\varepsilon_{cx}$ 的压缩载荷，单位为 N；

$\varepsilon_{cx}$——压缩应力-应变曲线上某一点对应的应变；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

6）当直接测量的是标距段变形时，压缩割线模量按下式计算：

$$E_{cx} = \frac{F_x L}{bh\Delta L_x} \times 10^{-3}$$

式中　$E_{cx}$——对应点的压缩割线模量，单位为 GPa；

$\Delta L_x$——与 $F_x$ 相对应的标距段变形量；

$F_x$——对应于 $\varepsilon_{cx}$ 的压缩载荷，单位为 N；

$L$——标距，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

## 7.7　纤维增强热固性塑料管轴向压缩试验

纤维增强热固性塑料管轴向压缩试验按照 GB/T 5350—2005《纤维增强热固性塑料

管轴向压缩性能试验方法》进行。

## 7.7.1　试样

**1. 试样形式**

轴向压缩试样如图 7-31 所示。

若试样不在端面破坏，可采用端头不加固的试样，但采用不同的试样，所测得的试验数据不可比。所采用试样的类型应在试验报告中注明。仲裁试验时，应采用端头加固的试样。

**2. 试样尺寸**

1）端头加固试样的高度 $H$ 为两加固段间距离 $L$ 加上两倍的加固段长度 $l$。

2）两加固段间距离 $L$ 为 30mm。

3）加固段长度 $l$ 为 10～15mm。加固层厚度 $t_0$ 在保证端面不破坏的条件下，不宜过厚，建议为试样壁厚的 0.5～1.0 倍。

4）端头不加固试样的高度 $H$ 为 30mm。

5）测定弹性模量时，可根据测量变形仪表的标距将试样高度 $H$ 适当加长。

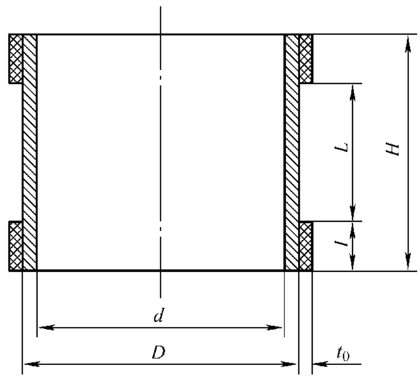



图 7-31　轴向压缩试样

$D$—试样外径（mm）　$d$—试样内径（mm）
$t_0$—加固层厚度（mm）　$l$—加固段长度（mm）
$L$—两加固段间距离（mm）　$H$—试样高度（mm）

**3. 试样加固段材料**

试样加固段材料的弹性模量应尽量与试样的弹性模量相接近。

**4. 加固段制作方法**

1）试样加固部位表面需打磨。若有胶瘤或其他突起物应修平。

2）用溶剂（如丙酮）清洗试样加固部位的表面。

3）采用有足够张力的湿法缠绕或其他适宜方法。

**5. 试样端面要求**

试样端面应平整、无分层、撕裂等现象，其余表面无损伤。试样两端面要求相互平行，且与试样轴线垂直。平行度误差应不大于 0.10mm。

## 7.7.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10%～90% 范围内（尽量落在满载的一边），且应不小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差应不超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差应不超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均应不超过 ±1%。

**2. 加载压板**

试验机的加载压板应平整、光滑，并有可调整压板平行度的装置。

## 7.7.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）至少在温度为 23℃ ±2℃的环境中放置 4h，并在相同环境下进行试验。不具备条件时在实验室环境温度下进行试验。仲裁试验时，试样至少在温度为 23℃ ±2℃和相对湿度为 50% ±10% 的环境中存放 40h，并在同样环境下进行试验。

2）将合格试样编号，测量试样尺寸：①在试样两加固段间两个不同截面的位置上，分别测量互相垂直的两个方向上的内、外径，取平均内径和平均外径；②测量试样每端面互相垂直两个方向上的非增强层厚度，取平均值。

3）安放试样，使试样的轴线与试验机上、下压板的中心对准。

4）加载，测定强度时，常规试验的加载速度为 5 ~ 6mm/min，仲裁试验为 1 ~ 2mm/min，测定弹性模量时为 1 ~ 2mm/min。

5）测定轴向压缩强度时，对试样施加均匀、连续的载荷直到破坏。记录最大载荷。

6）测定轴向压缩弹性模量时，在试样中间位置安放测量变形的仪表。采用自动记录装置时，可连续加载。若采用分级加载，至少分 5 级，施加的最大载荷不应超过材料的弹性变形范围。

7）对端面挤压破坏或加固段破坏的试样，应予作废。同批有效试样不足 5 个时，应重作试验。

**2. 结果表示**

1）轴向压缩强度按下式计算：

$$\sigma_c = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)}$$

式中　$\sigma_c$——轴向压缩强度，单位为 MPa；

$F$——破坏载荷（或最大载荷），单位为 N；

$D$——试样平均外径，单位为 mm；

$d$——试样平均内径（对有非增强层管材，试样平均内径应加上 2 倍的非增强层厚度），单位为 mm。

2）轴向压缩弹性模量按下式计算：

$$E_c = \frac{4L_0 \Delta F}{\pi \Delta L(D^2 - d^2)}$$

式中　$E_c$——轴向压缩弹性模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——材料弹性范围内的载荷增量，单位为 N；

$L_0$——仪表的标距，单位为 mm；

$\Delta L$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的标距 $L_0$ 内的变形增量，单位为 mm；

*D*——试样平均外径，单位为 mm；

*d*——试样平均内径（对有非增强层管材，试样平均内径应加上 2 倍的非增强层厚度），单位为 mm。

# 7.8　硫化橡胶短时间静压缩试验

硫化橡胶短时间静压缩试验按照 HG/T 3843—2008《硫化橡胶　短时间静压缩试验方法》进行。

## 7.8.1　试样

1）试样为圆柱体，可选用下列两种规格中的任意一种进行试验，两种试样的试验结果没有可比性：①直径 29.5mm ±0.5 mm，高度 12.5mm ±0.5mm；②直径 32.5mm ±1.0mm，高度 38.5mm ±1.0mm。

2）试样应光滑，不应有缺陷，上下表面应平行。

3）试样数量应不少于 3 个。

4）试样可用模具硫化，也可从模制的胶板或成品中切取。

## 7.8.2　试验设备

**1. 拉伸试验机或带有压缩装置的试验机**

拉伸试验机应符合 HG/T 2369 的规定，其测力精度应达到 B 级，压缩器移动速度能够达到 12mm/min ±3mm/min 或 25mm/min ±3mm/min。

**2. 压缩器**

压缩器示意图如图 7-32 所示。

**3. 量具**

测量试样高度和直径的量具应符合 GB/T 2941 的有关规定。用厚度计测试样的高度、用卡尺测试样的直径。

**4. 秒表**

秒表的计时分度至少为 1s。

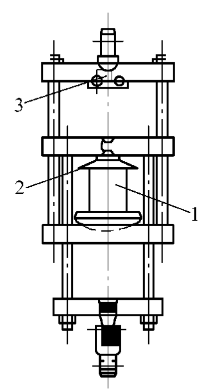


图 7-32　压缩器示意图

1—试样　2—压缩器

3—安装百分表处

## 7.8.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）压缩变形率可选择 10%、20%、25%、30%、40%，推荐选用 25%。压缩速度可选择 12mm/min ± 3mm/min 或 25mm/min ±3mm/min。两种速度所得的试验结果没有可比性。常规选用的压缩速度是 25mm/min ±3mm/min。

2）测量试样压缩前的高度 $h_0$ 和直径，分别测量 3 点，取算术平均值，精确到 0.01mm。

3）将压缩器安装在拉伸试验机上，试验前校准试验机负荷及百分表的零点。

4）选好压缩速度、压缩高度或负荷。压缩高度可根据试样压缩前高度 $h_0$ 计算，试验中百分表所示数值为试样已压缩的毫米数。

5）在试样两端涂少量滑石粉类隔离剂，并将试样置于压缩器上下平台中央。

6）开动拉伸试验机，压缩器按规定的下降速度压缩试样。

7）试样被压缩到规定压缩变形率或达到规定负荷时，立即停机。再马上重新开机，以原速向上运行，进行减压。上平台与试样表面刚一分开时，停止减压。

8）重新进行新一轮施压—减压操作。施压和减压之间的操作时间不应超过 10s。

9）每个试样反复压缩 3 次，记录第 3 次压缩时的高度 $h_1$（精确到 0.01mm）或选定压缩变形率所需的负荷 $F$（精确到 1N）。

10）从拉伸试验机上取下试样，停放 60s ± 10s 后，测量试样高度 $h_2$（精确到 0.01mm）。

**2. 结果表示**

1）试样单位横截面积所受的压力按下式计算：

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

式中　$\sigma$——试样单位横截面积所受压力，单位为 MPa；

$F$——作用于试样上的负荷，单位为 N；

$S$——试样被压缩前的横截面积，单位为 $mm^2$。

2）试样的压缩变形率 $\varepsilon_1$ 按下式计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon_1$——压缩率（%）；

$h_0$——试验前试样的高度，单位为 mm；

$h_1$——在规定负荷下试样的高度，单位为 mm。

3）试样永久变形率按下式计算：

$$\varepsilon_2 = \frac{h_0 - h_2}{h_0} \times 100\%$$

式中　$\varepsilon_2$——试样永久变形率（%）；

$h_0$——试验前试样的高度，单位为 mm；

$h_2$——试样除去压力，停放 60s 后的高度，单位为 mm。

4）试样单位横截面积所受压力的误差范围为 ±5%，压缩变形率的误差范围为 ±5%，永久变形的误差范围为 ±10%。

## 7.9　硫化橡胶或热塑性橡胶室温、高温和低温压缩试验

橡胶在压缩状态时，必然会发生物理和化学变化。当压缩力消失后，这些变化阻止橡胶恢复到其原来的状态，于是就产生了压缩永久变形。压缩永久变形的大小，取决于压缩状态的温度和时间，以及恢复高度时的温度和时间。在高温下，化学变化是导致橡

胶发生压缩永久变形的主要原因。压缩永久变形是去除施加给试样的压缩力，在标准温度下恢复高度后测得的。

在低温下试验，由玻璃态硬化和结晶作用造成的变化是主要的。当温度回升后，这些作用就会消失，因此必须在试验温度下测量试样高度。

1）所谓室温和高温试验，是指在标准实验室温度下，将已知高度的试样，按压缩率要求压缩到规定的高度，在规定温度条件下，压缩一定时间，然后在标准温度条件下除去压缩，将试样在自由状态下，回复规定时间，测量试样的高度。

2）所谓低温试验，是指在标准试验温度下，将已知高度的试样，按压缩率要求压缩到规定高度，在规定低温试验温度下，压缩一定时间，然后在相同低温下除去压缩，将试样在自由状态下回复，在低温下每隔一定时间测量试样的高度，得到一个试样高度与时间的对数曲线图，以此评价试样的压缩永久变形特性。

硫化橡胶或热塑性橡胶室温、高温和低温压缩试验按照 GB/T 7759—1996《硫化橡胶、热塑性橡胶　常温、高温和低温下压缩永久变形测定》进行。

## 7.9.1　试样

**1. 尺寸**

1）A 型：试样直径为 29mm ±0.5mm，高度为 12.5mm ±0.5mm 的圆柱体。

2）B 型：试样直径为 13mm ±0.5mm，高度为 6.3 ±0.3mm 的圆柱体。

A 型和 B 型两类试样试验结果不一定相同，可得的测试结果不能进行比较，测量橡胶压缩永久变形最好使用 A 型试样，使用大尺寸的试样可以获得精度较高的数据。

试样从成品中取时最好采用 B 型试样，并且尽可能在成品的中部取样。

**2. 试样制备**

用模压法制备试样，试样不应有气泡、杂质和损伤。

用裁刀制备试样，在胶片上裁切。

叠合型试样，试样可以从薄胶片上裁取圆片后叠合。叠合试样不超过 3 层。每层之间不能用粘接剂粘合。叠好的试样压缩 1min，使试样附着成一个整体，最后测量高度。

**3. 试样数量**

每组试样为 3 个。低温试验时，每个试样应单独安装在压缩装置里。

**4. 硫化到试验之间的间隔时间**

所有的试验，硫化到试验之间的最短时间是 16h。

对非成品试验，从硫化到试验之间的最长时间是 4 周；对成品试验，在可能情况下，从硫化到试验之间不超过 3 个月。

**5. 调节**

硫化到试验之间的间隔时间内，样品和试片应尽可能地避开光和热。

制备好的试片在试验之前应在 GB/T 2941 规定的一种标准温度下调节至少 3h，在整个试验期间或对比试期间内也应有与上述相同的标准温度。

对以研究结晶性能为目的的试验，在进行本试验之前，先将冷冻的试片放入 70℃ 高温箱中加热 45min，除去结晶然后在标准温度下调节。

## 7.9.2　试验设备

**1. 压缩装置**

压缩装置包括压缩板、限制器和紧固件。

1）压缩板由 2 块或 2 块以上不锈钢板或镀铬的钢板组成。压缩板表面粗糙度 $Ra$ 应不大于 0.4μm，而且应有足够的刚度，压缩板受压时，压缩板的弯曲不应超过 0.01mm。压缩板尺寸应足够大，使压缩的试样相互之间不接触。

钢板直径约为 115mm，厚度为 6.5mm 和 12.5mm。常用的压缩装置如图 7-33 所示。

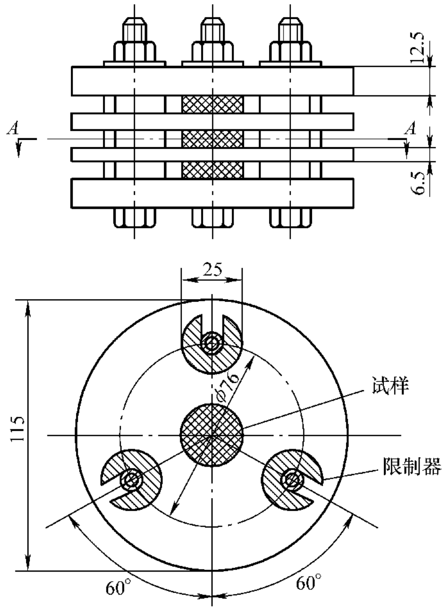



图 7-33　压缩装置

2）当进行低温试验时，压缩板应装有温度测量装置。测量精度为 ±0.5℃。

3）不锈钢限制器用限制器来控制试样压缩的高度，在确定限制器尺寸时，应保证限制器不与试样接触，建议用环状的限制器。橡胶国际硬度值不同，压缩率也不同，限制器的尺寸也不同。在一次试验时，要使用多个限制器，限制器的高度误差在 ±0.01mm 之内。限制器高度应根据试样的类型、高度、压缩率的要求选用，如表 7-10 所示。

**表 7-10　限制器高度**　　（单位：mm）

| 试样类型 | 压缩率为 25% 时 | 压缩率为 15% 时 | 压缩率为 10% 时 |
|---|---|---|---|
| A 型 | 9.3 ~ 9.4 | 10.6 ~ 10.7 | 11.25 ~ 11.3 |
| B 型 | 4.7 ~ 4.8 | 5.3 ~ 5.4 | 5.65 ~ 5.7 |

注：1. 进行结晶化研究时，为了能使压缩后试样高度在允许的误差范围内，保证压缩达到一定的精确度。A 型试样应备有三套限制器满足精确度的要求，分别为 9.12mm、9.38mm、9.62mm；B 型试样应备有四套限制器，分别为 4.56mm、4.67mm、4.78mm、4.89mm。

2. 如果没有一系列的限制器时，可使用垫块来获得正确的压缩高度，但试样压缩状态时，压缩板之间是平行的。

4）在标准试验温度或高温条件试验时，一个简单的螺杆装置即可满足压紧试样的要求。低温试验时，需一台带有快速放松的装置，该装置可以是机械的也可以是气动的。

**2. 高温箱和低温箱**

高温箱、低温箱能保持压缩装置和试样在规定的试验温度范围内。低温箱可以用机械制冷，也可以用干冰或液氮直接冷却。

因低温试验在低温中进行，为了使温度维持在允许的变化范围之内，可采用防止试验箱与外界直接接触的合适装备，从而可以在低温箱内测量试样高度。试验温度直接在压缩板附近测量，精度为 ±0.5℃。

高温箱、低温箱达到平衡温度的时间取决于它们的型号和压缩装置的热容量。为了使高温条件件持续时间为 24h 的试验结果有可比性，试验时内部温度最多在 3h 即应达到要求。

**3. 试验容器**

试验容器的材料，应能耐试验液体的腐蚀性，并具有良好的密闭性，如图 7-34 所示。

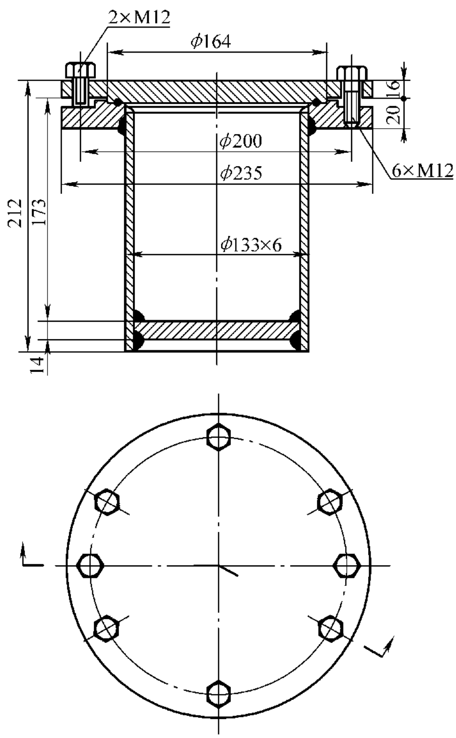



图 7-34　试验容器

## 7.9.3　试验内容及结果表示

**1. 试验时间**

试验时间从压缩装置放入达到试验温度的高温箱或低温箱时开始计时。试验时间为 22 ~ 24h、70 ~ 72h、166 ~ 168h 或 168h 的倍数。

在低温试验时最好选用 22 ~ 24h、70 ~ 72h。若是在规定的温度下作结晶或增塑剂迁移研究时，试验时间可更长。

**2. 试验温度**

1）在室温条件下的试验，试验温度为 23℃ ±2℃。

2）在高温或低温下的试验，试验温度从表 7-11 中选取。

**表 7-11　试验温度**

| 高温/℃ | 低温/℃ |
|---|---|
| 40 ±1、55 ±1、70 ±1、85 ±1、100 ±1、125 ±2、150 ±2、175 ±2、200 ±2、225 ±2、250 ±2 | 0 ±1、−10 ±1、−25 ±1、−40 ±1、−55 ±1、−70 ±1、−80 ±1、−100 ±1 |

**3. 试验步骤**

1）在压缩夹具的压缩板表面上涂一层润滑剂（滑石粉、甲基硅油），使试样不粘夹具。所用的润滑剂应对试验中的橡胶无影响，并且在试验报告中注明所用的润滑剂。在标准温度时，硅油或氟硅液的动黏滞性是 0.01$m^2/s$，是适用于大多数试验的一种润滑剂。

2）调整厚度计指针为零，测量试样中心部位的高度 $h_0$。3 个试样高度相差不超过 0.01mm。

3）将试样、限制器置于夹具中，均匀地压缩到规定的高度（$h_0$）压缩时试样、限制器不能互相接触。

4）把已装有试样的压缩夹具或试验容器放入达到的试验温度的高温箱或低温箱，即开始计算时间。

5）常温或高温试验结束后，立即松开紧固件，把试样放置于木板上，在标准温度环境下，自由状态下放置 30min ± 3min，然后用厚度计测量试样恢复高度 $h_1$，精确到 0.01mm；也可以让整个压缩夹具在室温下冷却 30 ~ 120min，再从压缩夹具中取出试样，停放 30min 测量试样高度。应在报告中注明停放时间。

6）低温试验后，在低温箱中立即松开紧固件，同时开始测量试样高度 $h_2$，如条件允许下最好每隔一段时间测量试样的高度，时间分别为 10s、30s、1min、3min、10min、30min 和 2h。这样可绘出试样高度与时间的对数曲线图。取试样应使用镊子钳。

7）耐液体试验时，先在试验容器内放入液体，液面为容器高度的 1/2，然后把已装有试样的压缩夹具放入容器内。试样必须浸没在液体中，试验用的液体不能重复使用，不同配方的试样不可在同一试验容器中进行试验。在液体中试验结束后，将试验容器冷却至接近室温，再把压缩夹具从容器中取出，夹具可用汽油等洗涤，时间不超过 30s，然后再进行测量，并在报告中注明试验容器的冷却时间。

8）整个试验结束后，检查试样内部有否缺陷、气泡。若试样内部有缺陷、气泡，则试样作废。

**4. 结果表示**

压缩永久变形按下式计算：

$$c = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_r} \times 100\%$$

式中　$c$——压缩永久变形（%）；

$h_0$——试样原高度，单位为 mm；

$h_r$——限制器的高度，单位为 mm；

$h_1$——试样恢复后的高度，单位为 mm。

# 第 8 章　材料弯曲性能测定试验

## 8.1　金属弯曲力学性能试验

金属弯曲力学性能试验按照 YB/T 5349—2006《金属弯曲力学性能试验方法》进行。

### 8.1.1　试样

**1. 试样的一般要求**

1）样坯切取的方向和部位应按 GB/T 2975—1998《钢及钢产品　力学性能试验取样位置及试样制备》的规定执行，切取样坯和机加工试样的方法不应改变材料的弯曲力学性能。

2）试样应平直，从盘卷切取的薄板试样允许稍有弯曲，但曲率半径与厚度之比应大于 500，不允许对试样进行矫直或矫平。

3）机加工试样的尺寸偏差和几何公差按表 8-1 的规定。几何公差为跨距范围内同一横截面尺寸的最大值与最小值之差。

**表 8-1　试样的尺寸偏差和几何公差**　　（单位：mm）

| 试样横截面尺寸范围 | 非机加工试样 | | 机加工试样 | |
|---|---|---|---|---|
| | 尺寸偏差 | 几何公差 | 尺寸偏差 | 几何公差 |
| >3 ~5 | ±0.5 | 公称尺寸的 3% | ±0.05 | 0.03 |
| >5 ~10 | ±1.0 | | ±0.10 | 0.05 |
| >10 ~20 | ±1.5 | | ±0.15 | 0.08 |
| >20 ~45 | ±2.0 | | ±0.20 | 0.10 |

4）硬金属试样的四个相邻侧面的表面粗糙度 $Ra$ 应不大于 0.4μm，四条长棱应进行 45°角倒棱，倒棱宽度不应超过 0.5mm。倒棱磨削机加工方向与试样长度方向相同。

5）薄板试样的两个宽面应保留原表面，两窄面的机加工表面粗糙度 $Ra$ 一般不大于 6.3μm，并应去除试样棱边的毛刺。

6）铸造试样需要机加工时，其表面粗糙度 $Ra$ 应不大于 3.2μm。

7）进行对比试验时，试样横截面形状、尺寸和跨距应相同。

8）制备试样时，应使由于发热和加工硬化的影响减至最小。试样表面应无裂纹和伤痕，棱边应无毛刺。

**2. 试样的形状和尺寸**

圆形横截面试样和矩形横截面试样的尺寸见表 8-2。薄板试样的尺寸要求见表 8-3。

**表 8-2　圆形横截面试样和矩形横截面试样的尺寸要求**　（单位：mm）

<table>
<tr><th rowspan="2">试样</th><th rowspan="2">试样直径<br>$d$</th><th rowspan="2">试样高度 × 试样宽度<br>$h \times b$</th><th colspan="2">三点弯曲</th><th colspan="2">四点弯曲</th><th rowspan="2">支承滚柱直径 $D_s$<br>施力滚柱直径 $D_a$</th></tr>
<tr><th>跨距<br>$L_s$</th><th>试样长度<br>$L$</th><th>跨距<br>$L_s$</th><th>试样长度<br>$L$</th></tr>
<tr><td rowspan="3">圆形横截面</td><td>5<br>10<br>13</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3">≥16$d$</td><td>$L_s+20$</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td>10</td></tr>
<tr><td>20</td><td rowspan="2">$L_s+d$</td><td>20 或 30</td></tr>
<tr><td>30<br>45</td><td>30</td></tr>
<tr><td rowspan="5">矩形横截面<br>（硬金属用）</td><td rowspan="5"></td><td>5 × 5<br>5.25 × 6.5</td><td>30<br>14.5</td><td>35<br>20</td><td rowspan="5">≥16$h$</td><td rowspan="3">$L_s+20$</td><td rowspan="2">5</td></tr>
<tr><td>5 × 5<br>5 × 7.5</td><td rowspan="4">≥16$h$</td><td rowspan="2">$L_s+20$</td></tr>
<tr><td>10 × 10<br>10 × 15<br>13 × 13<br>13 × 19.5</td><td>10</td></tr>
<tr><td>20 × 20<br>20 × 30</td><td rowspan="2">$L_s+h$</td><td rowspan="2">$L_s+h$</td><td>20 或 30</td></tr>
<tr><td>30 × 30<br>30 × 40</td><td>30</td></tr>
</table>

**表 8-3　薄板试样的尺寸要求**　（单位：mm）

<table>
<tr><th colspan="2">薄板试样横截面尺寸</th><th rowspan="3">试样高度<br>$h$</th><th rowspan="3">跨距<br>$L_s$</th><th rowspan="3">试样长度<br>$L$</th><th rowspan="3">刀刃半径<br>$R$</th></tr>
<tr><th colspan="2">产品宽度</th></tr>
<tr><th>≤10</th><th>>10</th></tr>
<tr><td rowspan="2">试样宽度 × 试样高度<br>$b \times h$</td><td rowspan="2">10 × 试样高度<br>$10 \times h$</td><td>0.25 ~ 0.5<br>>0.5 ~ 1.5</td><td>100$h$ ~ 150$h$<br>50$h$ ~ 100$h$</td><td>250$h$<br>160$h$</td><td>0.10 ~ 0.15</td></tr>
<tr><td>>1.5 ~ <5</td><td>80 ~ 120</td><td>110 ~ 150</td><td>2.5</td></tr>
</table>

### 3. 试样尺寸的测量

1）圆形横截面试样应在跨距两端和中间处两个相互垂直的方向测量其直径。计算弯曲弹性模量时，取用 3 处直径测量值的算术平均值。计算弯曲应力时，取用中间处直径测量值的算术平均值。

2）矩形横截面试样应在跨距的两端和中间处分别测量其高度和宽度。计算弯曲弹性模量时，取用 3 处高度测量值的算术平均值和 3 处宽度测量值的算术平均值。计算弯曲应力时，取用中间处测量的高度和宽度。对于薄板试样，高度测量值超过其平均值 2% 的试样不应用于试验。

3）按表 8-4 要求选用测量工具。测量尺寸时，应估读到最小分度的半个分度值。

**表 8-4　测量工具的最小分度值**　（单位：mm）

| 尺寸范围 | 测量工具最小分度值　≤ |
|---|---|
| 0.25 ~ 1.0 | 0.002 |
| >1.0 ~ 20 | 0.01 |
| >20 | 0.02 |

## 8.1.2　试验设备

**1. 试验机**

1）各类万能试验机和压力试验机均可使用，试验机精确度为 1 级或优于 1 级。

2）试验机应能在规定的速度范围内控制试验速度，加力、卸力应平稳、无振动、无冲击。

3）试验机应有三点弯曲和四点弯曲试验装置，施力时弯曲试验装置不应发生相对移动和转动。

4）试验机应配备记录弯曲力-挠度曲线的装置。

**2. 三点弯曲试验装置**（见图 8-1）

1）两支承滚柱的直径应相同，施力滚柱的直径一般与支承滚柱的直径相同。滚柱的长度应大于试样直径或宽度。

2）两支承滚柱的轴线应平行，施力滚柱的轴线应与支承滚柱的轴线平行。

3）施力滚柱的轴线至两支承滚柱的轴线的距离应相等，偏差不大于 ±0.5%。试验时，力的作用方向应垂直于两支承滚柱的轴线所在平面。

4）试验时，滚柱应能绕其轴线转动，但不发生相对位移。两支承滚柱间的距离应可调节，应带有指示距离的标记，跨距应精确到 ±0.5%。

5）滚柱的硬度应不低于试样的硬度，其表面粗糙度 $Ra$ 应不大于 0.8μm。

**3. 四点弯曲试验装置**（见图 8-2）

1）两支承滚柱和两施力滚柱的直径应分别相同，前者与后者的直径一般相同。滚柱的长度应大于试样的直径或宽度。

2）两支承滚柱的轴线和两施力滚柱的轴线应相互平行，前两者所在平面应与后两者所在平面平行。

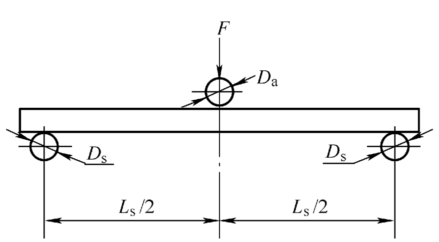



图 8-1　三点弯曲试验装置

$L_s$—挠度计跨度（mm）　$D_s$—支承滚柱直径（mm）

$D_a$—施力滚柱直径（mm）

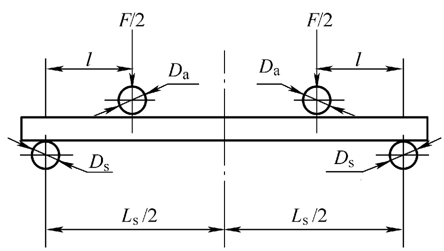



图 8-2　四点弯曲试验装置

$L_s$—挠度计跨度（mm）　$D_s$—支承滚柱直径（mm）

$D_a$—施力滚柱直径（mm）　$l$—力臂（mm）

$F$—弯曲力（N）

3）两力臂应相等，且一般不小于跨距的 1/4。力臂应精确到 ±0.5%，试验时，施力滚柱的力作用方向应垂直于支承滚柱的轴线所在平面。

4）试验时，滚柱应能绕其轴线转动，但不应发生相对位移。两支承滚柱间和两施

力滚柱间的距离应分别可调节，应带有指示距离的标记，跨距应精确到 ±0.5%。

**4. 薄板试样用三点弯曲试验装置**（见图 8-3）

1）支承刀和施力刀的刀刃半径应在 0.10 ~ 0.15mm 范围内，刀刃角度为 60° ±2°。其中一个支承刀刃和施力刀刃均为平直刀刃，刀刃长度应大于试样宽度；另一支承刀刃呈圆拱形，其半径为 13mm ±1mm。

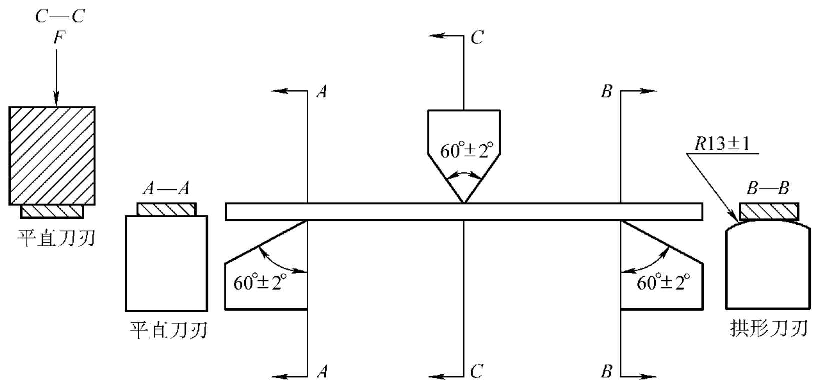



图 8-3　薄板试样用三点弯曲试验装置

2）施力刀的刃线应平行于支承刀的刃线及支承刀的刃线与另一支承点所在平面。施力刀刃的力作用方向应垂直于支承刀的刃线与另一支承点所在平面。

3）施力刀刃应位于两支承刀刃间的中点，偏差不大于 ±0.5%。两支承刀刃之间的距离应可调节，应带有指示距离的标记，跨距应精确到 ±0.5%。

4）支承刀和施力刀的硬度应不低于试样的硬度，刀刃表面应光滑。

**5. 薄板试样用四点弯曲试验装置**（见图 8-4）

1）两支承刀和两施力刀的刀刃半径应在 0.10 ~ 0.15mm 范围内，刀刃角度为 60° ±2°。其中一施力刀刃呈圆拱形，其半径应为 13mm ±1mm；其余刀刃均为平直刀刃，其刃线的长度应大于试样宽度。

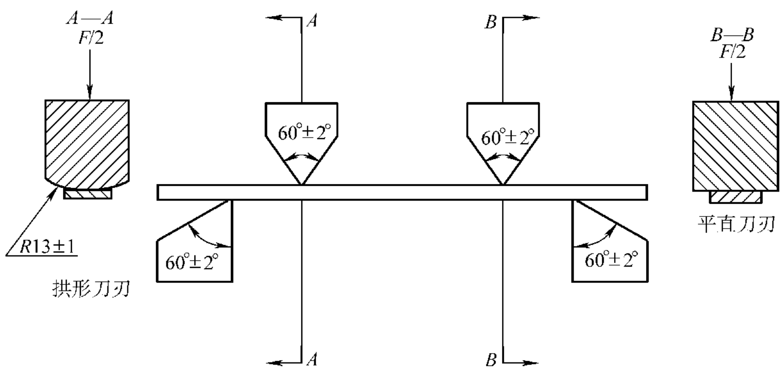



图 8-4　薄板试样用四点弯曲试验装置

2）两支承刀的刃线和平直施力刀的刃线应相互平行。平直施力刀的刃线和拱形刀刃的施力点所在平面应平行于两支承刀的刃线所在平面。两力臂应相等，且一般不小于

跨距的1/6。力臂应精确到 ±0.5%，试验时，施力刀刃的力作用方向应垂直于两支承刀的刃线所在平面。

3）两施力刀刃间和两支承刀刃间的距离均应可调节，应带有指示距离的标记，跨距应精确到 ±0.5%。

4）支承刀和施力刀的硬度应不低于试样的硬度，刀刃表面应光滑。

**6. 挠度计**

1）应根据所测性能按表8-5选用挠度计。

表 8-5　挠度计的选择

| 性能 | 规定非比例弯曲应变(%) | 允许挠度计位移示值相对误差(%) |
|---|---|---|
| $E_b$ | | ±0.3 |
| $\sigma_{pb}$、$\sigma_{rb}$ | <0.05 | ±0.3 |
| | 0.05～0.2 | ±0.5 |
| | >0.2 | ±1.0 |
| $U$、$f_{bb}$ | | ±1.0 |

注：$E_b$—弯曲弹性模量（MPa），$\sigma_{pb}$—规定非比例弯曲应力（MPa），$\sigma_{rb}$—规定残余弯曲应力（MPa），$U$—弯曲断裂能量（J），$f_{bb}$—断裂挠度（mm）。

2）挠度计跨距与其标称值之差应不大于 ±0.5%。

3）采用挠度计测量试样挠度时，挠度计对试样产生的附加弯曲力应尽可能小，一般不大于试验中所施加弯曲力的0.05%。

## 8.1.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）试验一般在10～35℃的范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为23℃ ±5℃。

2）弯曲试验时，应缓慢施加弯曲力。

3）试验时，弯曲应力增加速率应控制在3～30MPa/s范围内某个尽量恒定的值。

**2. 弯曲弹性模量的测定**

（1）人工记录方法　将挠度计装于测量位置上，试样对称地安放于弯曲试验装置。对试样施加相当于规定非比例弯曲应力 $\sigma_{pb0.01}$（或规定残余弯曲应力 $\sigma_{rb0.01}$）10%以下的预弯曲力 $F_0$，并记录此力和跨距中点处的挠度 $f$；然后对试样连续施加弯曲力，直至相应于 $\sigma_{pb0.01}$（或 $\sigma_{rb0.01}$）的50%，记录弯曲力的增量 $\Delta F$ 和相应挠度的增量 $\Delta f$。三点弯曲试验时，按下式计算弯曲弹性模量：

$$E_b=\frac{L_s^3}{48I}\left(\frac{\Delta F}{\Delta f}\right)$$

式中　$E_b$——弯曲弹性模量，单位为MPa；

$L_s$——跨距，单位为mm；

$\Delta F$——弯曲力增量，单位为N；

$\Delta f$——挠度增量，单位为mm；

$I$——试样截面惯性矩，单位为$mm^4$。

四点弯曲试验时，按下式计算弯曲弹性模量：

$$E_{\mathrm{b}}=\frac{l(3L_{\mathrm{s}}^{2}-4l^{2})}{48I}\left(\frac{\Delta F}{\Delta f}\right)$$

式中　$E_{\mathrm{b}}$——弯曲弹性模量，单位为 MPa；

$L_{\mathrm{s}}$——跨距，单位为 mm；

$\Delta F$——弯曲力增量，单位为 N；

$\Delta f$——挠度增量，单位为 mm；

$l$——力臂，单位为 mm；

$I$——试样截面惯性矩，单位为 $mm^4$，对于圆形横截面试样，按下式计算：

$$I=\frac{1}{64}\pi d^{4}$$

对于矩形横截面试样，按下式计算：

$$I=\frac{1}{12}bh^{3}$$

式中　$d$——试样直径，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样高度，单位为 mm。

（2）图解法　将挠度计装于测量位置上，挠度计跨距的端点与最邻近支承点或施力点的距离应不小于试样的高度或直径。试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力，同时采用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线，直至超过相应于 $\sigma_{\mathrm{pb0.01}}$（或 $\sigma_{\mathrm{rb0.01}}$）的弯曲力。记录时，建议力轴比例和挠度轴放大倍数的选择，应使曲线弹性直线段与力轴的夹角不小于 40°，弹性直线段的高度应超过力轴量程的 3/5。在记录的曲线图上，借助于直尺的直边确定最佳弹性直线段，读取该直线段的弯曲力增量 $\Delta F$ 和相应的挠度增量 $\Delta f$，如图 8-5 所示。

三点弯曲试验时，按下式计算弯曲弹性模量：

$$E_{\mathrm{b}}=\frac{L_{\mathrm{e}}^{2}(3L_{\mathrm{s}}-L_{\mathrm{e}})}{96I}\left(\frac{\Delta F}{\Delta f}\right)$$

式中　$E_{\mathrm{b}}$——弯曲弹性模量，单位为 MPa；

$L_{\mathrm{s}}$——跨距，单位为 mm；

$L_{\mathrm{e}}$——挠度计跨距，单位为 mm；

$\Delta F$——弯曲力增量，单位为 N；

$\Delta f$——挠度增量，单位为 mm；

$I$——试样截面惯性矩，单位为 $mm^4$。

四点弯曲试验时，按下式计算弯曲弹性模量：

$$E_{\mathrm{b}}=\frac{lL_{\mathrm{e}}^{2}}{16I}\left(\frac{\Delta F}{\Delta f}\right)$$

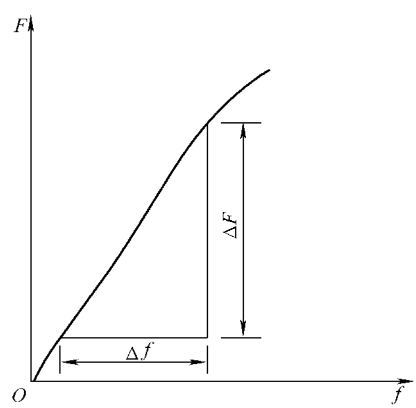



图 8-5　图解法测定弯曲弹性模量

式中　$E_b$——弯曲弹性模量，单位为 MPa；

$l$——力臂，单位为 mm；

$L_e$——挠度计跨距，单位为 mm；

$\Delta F$——弯曲力增量，单位为 N；

$\Delta f$——挠度增量，单位为 mm；

$I$——试样截面惯性矩，单位为 $mm^4$。

**3. 规定非比例弯曲应力的测定**

安装好挠度计，将试样对称地安放于弯曲试验装置上。对试样连续施加弯曲力，采用自动方法连续记录弯曲力-挠度曲线。记录时，力轴每 1mm 所代表的应力应不大于 15MPa，并使曲线上所测 $F_{pb}$ 处于力轴量程的 1/2 以上。挠度放大倍数的选择应使图 8-6 曲线图上的 $OC$ 段长度不小于 15mm。在记录的曲线图上，自弹性直线段与挠度轴的交点 $O$ 起，截取相应于规定非比例弯曲应变的 $OC$ 段。过 $C$ 点做弹性直线段的平行线 $CA$ 交曲线于 $A$ 点，$A$ 点所对应的力即为所测规定非比例弯曲力 $F_{pb}$，如图 8-6 所示。

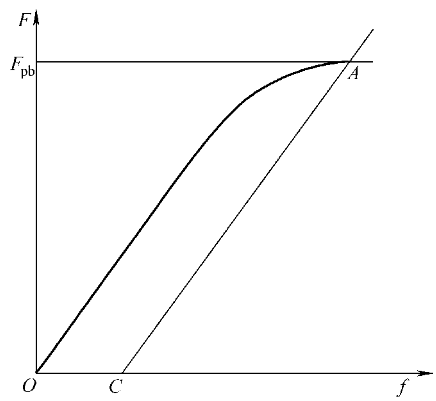



图 8-6　图解法测定规定非比例弯曲应力

规定非比例弯曲应力按下式计算：

$$\sigma_{pb}=\frac{F_{pb}l}{2W}$$

式中　$\sigma_{pb}$——规定非比例弯曲应力，单位为 MPa；

$F_{pb}$——规定非比例弯曲力，单位为 N；

$l$——力臂，单位为 mm；

$W$——试样截面系数，单位为 $mm^3$，对于圆形横截面试样，按下式计算；

$$W=\frac{1}{32}\pi d^3$$

对于矩形横截面试样，按下式计算：

$$W=\frac{1}{6}bh^2$$

式中　$d$——试样直径，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样高度，单位为 mm。

**4. 规定残余弯曲应力的测定**

1）将试样对称地安放于弯曲试验装置上，并对其施加相应于预期 $\sigma_{rb0.01}$ 的 10% 的预弯曲力 $F_0$。测量跨距中点的挠度，记取此时挠度计的读数作为零点。对试样连续或分级施加弯曲力，并将其卸除至预弯曲力 $F_0$，测量残余挠度 $f_{rb}$。反复递增施力和卸力，直至测量的残余挠度达到或稍超过规定残余弯曲应变相应的挠度。

2）按下式计算规定残余弯曲力：

$$F_{rb}=F_{n-1}+\left(\frac{F_n-F_{n-1}}{f_n-f_{n-1}}\right)(f_{rb}-f_{n-1})$$

式中　$F_{rb}$——规定残余弯曲力，单位为 N；

$F_{n-1}$——最后前一次施加的弯曲力，单位为 N；

$F_n$——最后一次施加的弯曲力，单位为 N；

$f_n$——最后一次施力并将其卸除后的残余挠度，单位为 mm；

$f_{n-1}$——最后前一次施力并将其卸除后的残余挠度，单位为 mm；

$f_{rb}$——达到规定残余弯曲应变时的残余挠度，单位为 mm，三点弯曲试验时，按下式计算：

$$f_{rb}=\frac{L_s^2}{12Y}\varepsilon_{rb}$$

四点弯曲试验时，按下式计算：

$$f_{rb}=\frac{3L_s^2-4l^2}{24Y}\varepsilon_{rb}$$

式中　$l$——力臂，单位为 mm；

$L_s$——跨距，单位为 mm；

$\varepsilon_{rb}$——规定残余弯曲应变（%）；

$Y$——试样宽度系数，对于圆形横截面试样 $Y=d/2$，对于矩形横截面试样，$Y=h/2$。

3）三点弯曲试验的规定残余弯曲应力按下式计算：

$$\sigma_{rb}=\frac{F_{rb}L_s}{4W}$$

4）四点弯曲试验的规定残余弯曲应力按下式计算：

$$\sigma_{rb}=\frac{F_{rb}l}{2W}$$

式中　$L_s$——跨距，单位为 mm；

$l$——力臂，单位为 mm；

$W$——试样截面系数，单位为 $mm^3$。

**5. 抗弯强度的测定**

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力，直至试样断裂。从试验机测力度盘上或从记录的弯曲力-挠度曲线上读取最大弯曲力 $F_{bb}$。三点弯曲试验时按下式计算抗弯强度：

$$\sigma_{bb}=\frac{F_{bb}L_s}{4W}$$

四点弯曲试验时按下式计算抗弯强度：

$$\sigma_{bb}=\frac{F_{bb}l}{2W}$$

式中　$F_{bb}$——最大弯曲力，单位为 N；

$L_s$——跨距，单位为 mm；

$l$——力臂，单位为 mm；

$W$——试样截面系数，单位为 $mm^3$。

**6. 断裂挠度的测定**

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力，直至试样断裂。测量试样断裂瞬间跨距中点的挠度，此挠度即为断裂挠度 $f_{bb}$，单位为 mm。

测定断裂挠度一般可与测定抗弯强度在同一试验中进行，可以利用试验机横梁位移来测定断裂挠度，但应修正试验机柔性等因素的影响。

**7. 弯曲断裂能量的测定**

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，对试样连续施加弯曲力。测量试样在跨距中点的挠度，用自动方法连续记录弯曲力-挠度（$E$-$f$）曲线，直至试样断裂，如图 8-7 所示。

在记录的曲线图上，用面积仪或其他方法求得弯曲力-挠度曲线下的面积 $S$，精确到 ±2%，按下式计算弯曲断裂能量：

$$U = \frac{ZS}{n} \times 10^{-3}$$

式中　$U$——弯曲断裂能量，单位为 J；

$Z$——力轴每毫米代表的力值，单位为 N/mm；

$S$——弯曲试验曲线下包围的面积，单位为 $mm^2$。

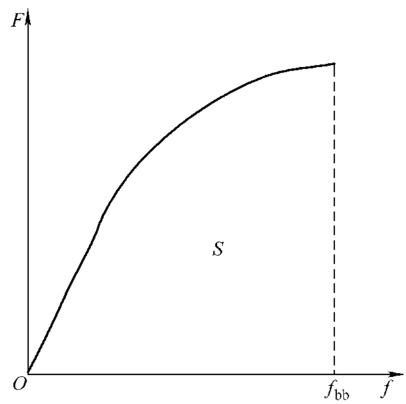



图 8-7　图解法测定弯曲断裂能量

**8. 测试结果数值的修约**

测试结果的数值修约见表 8-6，修约按照 GB/T 8170—2008《数值修约规则与极限数值的表示和判定》进行。

**表 8-6　测试结果的数值修约**

| 性　能 | 范　围 | 修约到的数值 |
|---|---|---|
| $E_b$/MPa | ≤150000 | 500 |
| | >150000 | 1000 |
| $\sigma_{pb}$、$\sigma_{rb}$、$\sigma_{bb}$/MPa | ≤200 | 1 |
| | >200～1000 | 5 |
| | >1000 | 10 |
| $f_{bb}$/mm | | 0.1 |
| $U$/J | <10 | 0.05 |
| | ≥10 | 0.1 |

## 8.2　金属材料弯曲试验

金属材料弯曲试验按照 GB/T 232—2010《金属材料　弯曲试验方法》进行。

## 8.2.1　试样

**1. 一般要求**

试验使用圆形、方形、矩形或多边形横截面的试样。样坯的切取位置和方向应按照相关产品标准的要求。如未具体规定，对于钢产品，应按照 GB/T 2975 的要求。试样应去除由于剪切或火焰切割或类似的操作而影响了材料性能的部分。如果试验结果不受影响，允许不去除试样受影响的部分。

**2. 矩形试样的棱边**

试样表面不得有划痕和损伤。方形、矩形和多边形横截面试样的棱边应倒圆。

1）当试样厚度小于 10mm 时，倒圆半径不能超过 1mm。

2）当试样厚度大于等于 10mm 且小于 50mm 时，倒圆半径不能超过 1.5mm。

3）当试样厚度大于等于 50mm 时，倒圆半径不能超过 3mm。

棱边倒圆时不应形成影响试验结果的横向毛刺、伤痕或刻痕。如果试验结果不受影响，允许试样的棱边不倒圆。

**3. 试样的宽度**

试样宽度应按照相关产品标准的要求，如未具体规定，应按照以下要求：

1）当产品宽度不大于 20mm 时，试样宽度为原产品宽度。

2）当产品宽度大于 20mm 时：①当产品厚度小于 3mm 时，试样宽度为 20mm ± 5mm；②当产品厚度不小于 3mm 时，试样宽度在 20～50mm 之间。

**4. 试样的厚度**

试样厚度或直径应按照相关产品标准的要求，如未具体规定，应按照以下要求：

1）对于板材、带材和型材，试样厚度应为原产品厚度。如果产品厚度大于 25mm，试样厚度可以机加工减薄至不小于 2mm，并保留一侧原表面。弯曲试验时，试样保留的原表面应位于受拉变形一侧。

2）直径（圆形横截面）或内切圆直径（多边形横截面）不大于 30mm 的产品，其试样横截面应为原产品的横截面。对于直径或多边形横截面内切圆直径超过 30mm 但不大于 50mm 的产品，可以将其机加工成横截面内切圆直径不小于 25mm 的试样。直径或多边形横截面内切圆直径大于 50mm 的产品，应将其机加工成横截面内切圆直径不小于 25mm 的试样（见图 8-8）。试验时，试样未经机加工的原表面应置于受拉变形的一侧。

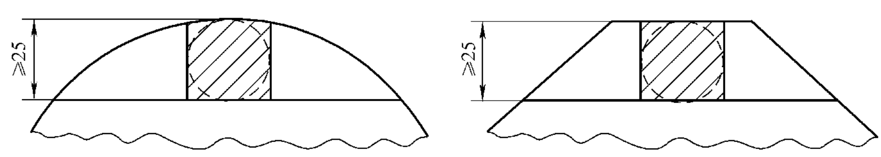



图 8-8　试样加工尺寸

3）锻材、铸材和半成品的试样，其尺寸和形状应在交货要求或协议中规定。

**5. 试样的长度**

试样长度应根据试样厚度（或直径）和所有使用的试验设备确定。

## 8.2.2　试验设备

**1. 一般要求**

弯曲试验应在配备下列弯曲装置之一的试验机或压力机上完成：

1）配有两个支辊和一个弯曲压头的支辊式弯曲装置，如图 8-9 所示。

2）配有一个 V 形模具和一个弯曲压头的 V 形模具式弯曲装置，如图 8-10 所示。

3）台虎钳式弯曲装置，如图 8-11 所示。

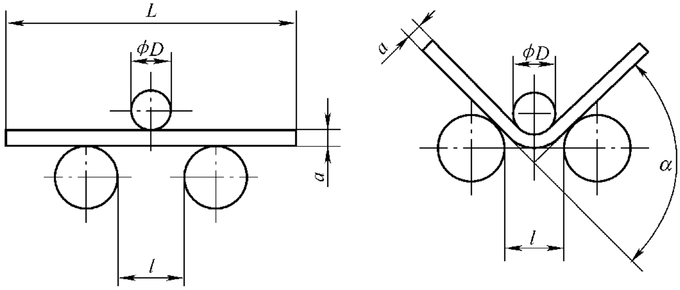



图 8-9　支辊式弯曲装置

$a$—试样厚度或直径（mm）　$D$—弯曲压头直径（mm）　$L$—试样长度（mm）

$l$—支辊间距离（mm）　$\alpha$—弯曲角度（°）

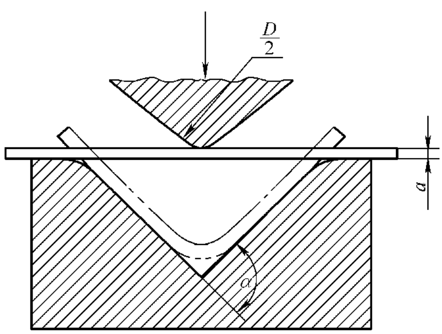



图 8-10　V 形模具式弯曲装置

$a$—试样厚度或直径（mm）　$D$—弯曲压头直径（mm）　$\alpha$—弯曲角度（°）

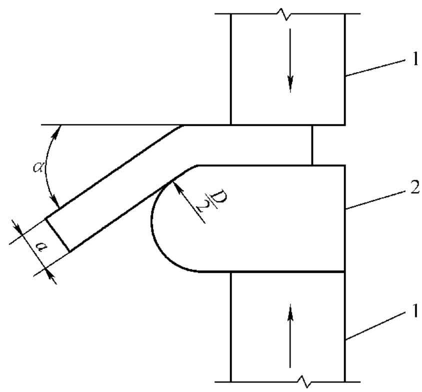



图 8-11　台虎钳式弯曲装置

$a$—试样厚度或直径（mm）　$D$—弯曲压头直径（mm）

1—台虎钳　2—弯曲压头

**2. 支辊式弯曲装置**

1）支辊长度和弯曲压头的宽度应大于试样宽度或直径。弯曲压头的直径由产品标

准规定。支辊和弯曲压头应具有足够的硬度。

2）除非另有规定，支辊间距离 $l$ 应按照下式确定：

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$$

此距离在试验期间应保持不变。

**3. V 形模具式弯曲装置**

模具的 V 形槽的角度应为 180° $-\alpha$，弯曲角度 $\alpha$ 应在相关产品标准中规定。

模具的支承棱边应倒圆，其倒圆半径应为 1～10 倍试样厚度。模具和弯曲压头宽度应大于试样宽度或直径，并应具有足够的硬度。

**4. 台虎钳式弯曲装置**

装置由台虎钳及有足够硬度的弯曲压头组成，可以配置加力杠杆。弯曲压头直径应按照相关产品标准要求，弯曲压头宽度应大于试样宽度或直径。

由于台虎钳左端面的位置会影响测试结果，因此台虎钳的左端面不能达到或者超过弯曲压头中心垂线。

**5. 其他弯曲装置**

符合弯曲试验原理的其他弯曲装置（例如翻板式弯曲装置等）亦可使用。

## 8.2.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）试验一般在 10～35℃的范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为 23℃ ±5℃。

2）按照相关产品标准规定，采用下列方法之一完成试验：①试样在给定的条件和力作用下弯曲至规定的弯曲角度；②试样在力作用下弯曲至两臂相距规定距离且相互平行；③试样在力作用下弯曲至两臂直接接触。

3）试样弯曲至规定弯曲角度的试验，应将试样放于两支辊上，试样轴线应与弯曲压头轴线垂直，弯曲压头在两支座之间的中点处对试样连续施加力使其弯曲，直至达到规定的弯曲角度。弯曲角度 $\alpha$ 可以通过测量弯曲压头的位移计算得出。按图 8-12 和下式计算：

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{pc + W(f - c)}{p^2 + (f - c)^2}$$

$$\cos\frac{\alpha}{2} = \frac{Wp - c(f - c)}{p^2 + (f - c)^2}$$

$$W = \sqrt{p^2 + (f - c)^2 - c^2}$$

$$c = 25\text{mm} + a + \frac{D}{2}$$

式中　$\alpha$——弯曲角度，单位为度（°）；

$a$——试样厚度或直径，单位为 mm；

$D$——弯曲压头直径，单位为 mm；

$c$——试验前支辊中心轴所在水平面与弯曲压头中心轴所在水平面之间的间距，单位为 mm；

$p$——试验后支辊中心轴所在垂直面与弯曲压头中心轴所在垂直面之间的间距，单位为 mm；

$f$——弯曲压头的移动距离，单位为 mm；

$W$——相关系数。

可以采用图 8-11 所示的方法进行弯曲试验，试样一端固定，绕弯曲压头进行弯曲，可以绕过弯曲压头，直达到规定的弯曲角度。

4）弯曲试验时，应当缓慢地施加弯曲力，以使材料能够自由地进行塑性变形。当出现争议时，试验速率应为 1mm/s ±0. 2mm/s。使用上述方法如不能直接达到规定的弯曲角度，可将试样置于两平行压板之间，如图 8-13 所示，连续施加力压其两端使进一步弯曲，直至达到规定的弯曲角度。

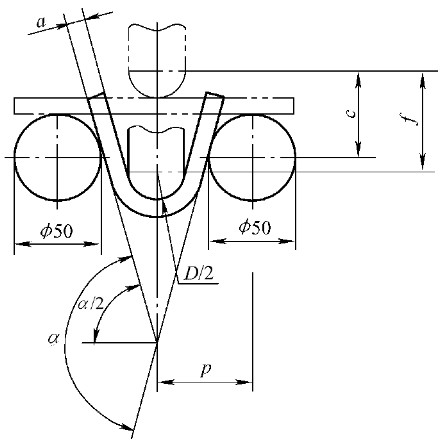



图 8-12　弯曲角度的测量

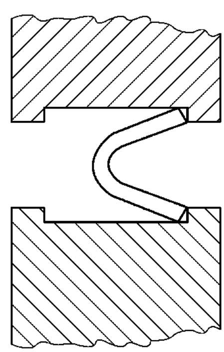


图 8-13　平行压板之间的初步弯曲

5）试样弯曲至两臂相互平行的试验，首先对试样进行初步弯曲，然后将试样置于两平行压板之间，连续施加力压其两端使进一步弯曲，直至两臂平行，如图 8-14 所示。试验时可以加或不加内置垫块。垫块厚度等于规定的弯曲压头直径，除非产品标准中另有规定。

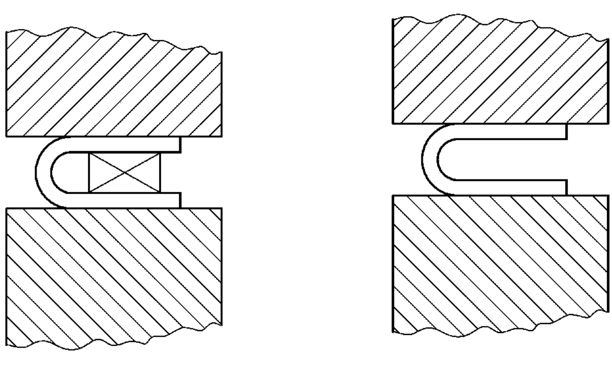


图 8-14　平行压板之间的后续弯曲

6）试样弯曲至两臂直接接触的试验，首先对试样进行初步弯曲，然后将试样置于两平行压板之间，连续施加力压其两端使进一步弯曲，直至两臂直接接触，如图 8-15 所示。

**2. 试验结果评定**

1）应按照相关产品标准的要求评定弯曲试验结果。如未规定具体要求，弯曲试验后不使用放大仪器观察，试样弯曲外表面无可见裂纹应评定为合格。

2）以相关产品标准规定的弯曲角度作为最小值；若规定弯曲压头直径，以规定的弯曲压头直径作为最大值。

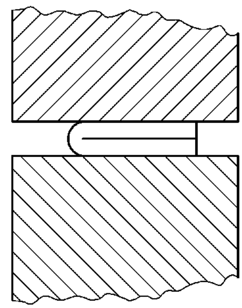


图 8-15　两臂直接接触的弯曲

## 8.3　金属线材反复弯曲试验

金属线材反复弯曲试验按照 GB/T 238—2002《金属材料　线材　反复弯曲试验方法》进行。

### 8.3.1　试样

1）线材试样应尽可能平直。但试验时，在其弯曲平面内允许有轻微的弯曲。

2）必要时试样可以用手矫直。在用手不能矫直时，可在木材、塑性材料或铜的平面上用相同材料的锤头矫直。

3）在矫直过程中，不得损伤线材表面，且试样也不得产生任何扭曲。

4）有局部硬弯的线材应不矫直。

### 8.3.2　试验设备

1）试验机的工作原理如图 8-16 所示。

2）圆柱支座和夹持块应有足够的硬度（以保证其刚度和耐磨性），圆柱支座半径不得超出表 8-7 给出的公称尺寸允许偏差。圆柱支座轴线应垂直于弯曲平面并相互平行，而且在同一平面内，偏差不超过 0.1mm。夹块的夹持面应稍突出于圆柱支座但不超过 0.1mm，即测量两圆柱支座的曲率中心连线上试样与圆柱支座间的间隔不大于 0.1mm。夹块的顶面应低于两圆柱支座曲率中心连线。当圆柱支座半径等于或小于 2.5mm 时，$y$ 值为 1.5mm，当圆柱支座半径大于 2.5mm 时，$y$ 值为 3mm。

**表 8-7　支座及拨杆孔的要求**　（单位：mm）

| 线材公称直径或厚度 $d(a)$ | 圆柱支座半径 $r$ | 距离 $h$ | 拨杆孔直径 $d_g$① |
|---|---|---|---|
| 0.3 ~ 0.5 | 1.25 ± 0.05 | 15 | 2.0 |
| >0.5 ~ 0.7 | 1.75 ± 0.05 | 15 | 2.0 |
| >0.7 ~ 1.0 | 2.5 ± 0.1 | 15 | 2.0 |
| >1.0 ~ 1.5 | 3.75 ± 0.1 | 20 | 2.0 |
| >1.5 ~ 2.0 | 5.0 ± 0.1 | 20 | 2.0 和 2.5 |
| >2.0 ~ 3.0 | 7.5 ± 0.1 | 25 | 2.5 和 3.5 |
| >3.0 ~ 4.0 | 10 ± 0.1 | 35 | 3.5 和 4.5 |

（续）

| 线材公称直径或厚度 $d(a)$ | 圆柱支座半径 $r$ | 距离 $h$ | 拨杆孔直径 $d_g$① |
|---|---|---|---|
| >4.0～6.0 | 15±0.1 | 50 | 4.5 和 7.0 |
| >6.0～8.0 | 20±0.1 | 75 | 7.0 和 9.0 |
| >8.0～10.0 | 25±0.1 | 100 | 9.0 和 11.0 |

① 较小的拨杆孔直径适用于较细公称直径的线材（见第 1 列），而较大的拨杆孔直径适用于较粗公称直径的线材（也见第 1 列）。对于在第 1 列所列范围直径，应选择合适的拨杆孔直径以保证线材在孔内自由运动。

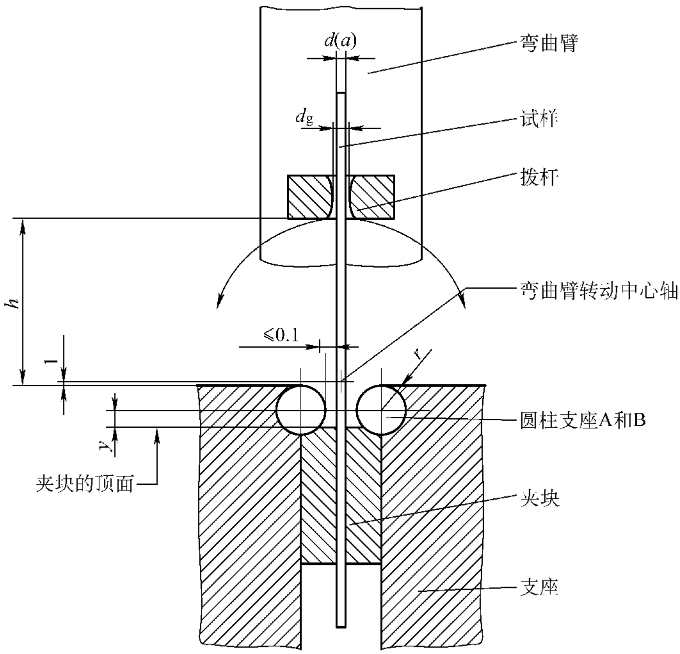



图 8-16　试验机的工作原理

$h$—圆柱支座顶部至拨杆底部距离（mm）　$r$—圆柱支座半径（mm）　$y$—两圆柱支座轴线所在平面与试样最近接触点的距离（mm）　$d_g$—拨杆孔直径（mm）　$d$—圆金属线材直径（mm）　$a$—装在两平行夹具间的非圆截面试样最小厚度（mm）

## 8.3.3　试验内容及结果表示

1）试验一般在 10～35℃的范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为 23℃±5℃。

2）根据表 8-7 所列线材直径，选择圆柱支座半径 $r$、圆柱支座顶部至拨杆底部距离 $h$ 以及拨杆孔直径 $d_g$。

3）使弯曲臂处于垂直位置，将试样由拨杆孔插入，试样下端用夹块夹紧，并使试样垂直于圆柱支座轴线。非圆形试样的夹持，应使其较大尺寸平行于或近似平行于夹持面，如图 8-17 所示。

4）弯曲试验是将试样弯曲 90°，再向相反方向交替进行。将试样自由端弯曲 90°，再返回至起始位置作为第一次弯曲，然后依次向相反方向进行连续而不间断地反复弯

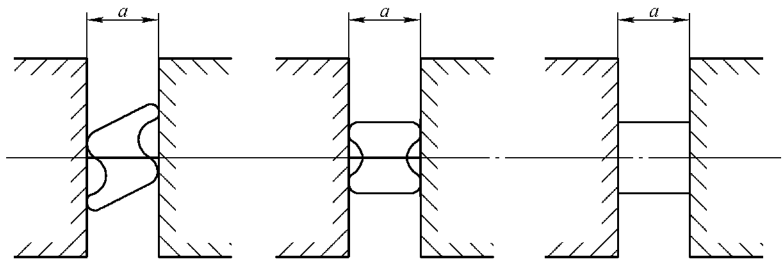



图 8-17　非圆形试样的夹持

$a$—装在两平行夹具间的非圆截面试样最小厚度（mm）

曲，如图 8-18 所示。

5）弯曲操作应以每秒不超过一次的均匀速率平稳无冲击地进行。必要时，应降低弯曲速率以确保试样产生的热量不致影响试验结果。

6）试验中为确保试样与圆柱支座圆弧面的连续接触，可对试样施加某种形式的张紧力，施加的张紧力不得超过试样公称抗拉强度相对应力值的 2%。

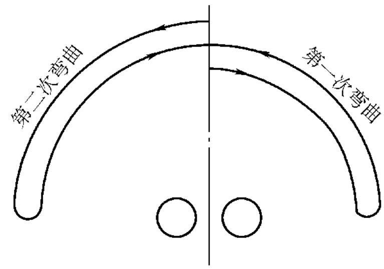



图 8-18　线材的弯曲

7）连续试验至相关产品标准中规定的弯曲次数或肉眼可见的裂纹为止，或者如相关产品标准规定，连续试验至试样完全裂断为止。

8）试样断裂的最后一次弯曲不计入弯曲次数。

## 8.4　钢筋混凝土用钢筋弯曲和反向弯曲试验

钢筋混凝土用钢筋弯曲和反向弯曲试验按照 YB/T 5126—2003《钢筋混凝土用钢筋弯曲和反向弯曲试验方法》进行。

### 8.4.1　试样

1）按照 GB/T 2975 有关规定或供需双方协议切取试样，试样应为交货状态。

2）试样应保留原轧制表面，并应平直，试样长度以满足试验要求为准。

3）试样预定弯曲部位内不允许有任何机械或手工加工的伤痕。

### 8.4.2　试验设备

**1. 弯曲装置**

图 8-19 所示为一个弯曲装置实例。一辊固定，另一辊使试样绕弯曲圆弧面（弯心）进行弯曲；也可以将两辊固定，弯曲圆弧面（弯心）向两辊中间运动，使试样两臂绕弯曲圆弧面（弯心）进行弯曲试验；也可以在万能试验机上使用装有角度指示器的弯曲装置来进行。

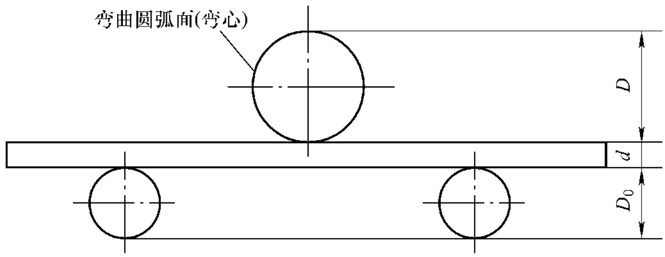



图 8-19　弯曲装置实例

*D*—弯曲圆弧面（弯心）直径（mm）　$D_0$—工作辊直径（mm）　*d*—试样直径（mm）

**2. 反向弯曲装置**

图 8-20 所示为一个反向弯曲装置实例。反向弯曲角度可以在角度指示器上被指示出来。弯曲和反向弯曲角度如图 8-21 所示。

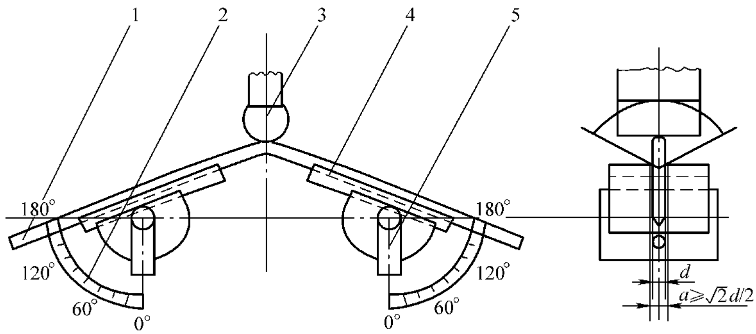



图 8-20　带有角度指示器的反向弯曲装置实例

1—试样　2—角度盘　3—弯心　4—翻板滑块　5—指针

*d*—试样直径（mm）　*a*—槽形翻板滑块的槽宽（mm）

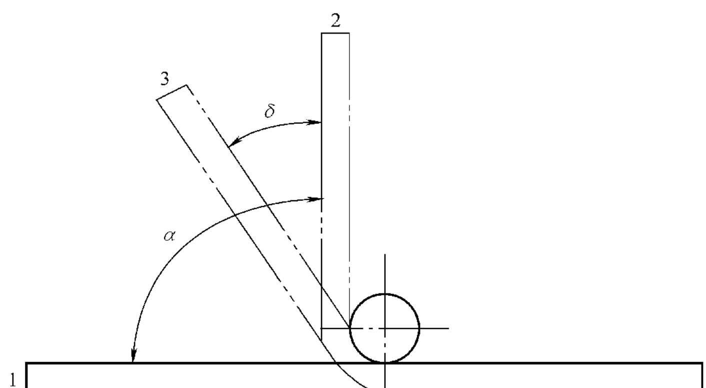



图 8-21　弯曲和反向弯曲角度

1—起始位置　2—弯曲 $\alpha$ 角位置　3—反向弯曲 $\delta$ 角位置

### 8.4.3　试验内容及结果表示

**1. 弯曲试验**

1）试验应在 10～35℃的室温下进行。

2）试样应绕弯曲圆弧面（弯心）进行弯曲，弯曲角度 $\alpha$ 和弯曲圆弧面（弯心）直径 $D$ 应符合相关产品标准的要求。

3）弯曲速度应不大于 20°/s，可通过对角度指示器所指示的角度进行观察，以调速停机来准确控制弯曲角度，也可以通过可设定和显示角度的仪器仪表来自动控制弯曲角度。试验完成后应仔细观测试样，若无目视可见的裂纹，则评定为合格。

**2. 反向弯曲试验**

1）试样应绕弯曲圆弧面（弯心）进行弯曲，弯曲角度 $\alpha$ 和弯曲圆弧面（弯心）直径 $D$ 应符合相关产品标准的要求。试验应在 10～35℃的室温下进行。

2）弯曲后的试样应在 100℃的温度下进行时效热处理，保温时间至少为 30min，在空气中自由冷却至室温后，进行反向弯曲试验。根据相关产品标准或供需双方协议规定，弯曲后的试样也可不进行时效热处理而直接在室温下进行反向弯曲试验。

3）反向弯曲速度应不大于 20°/s。当反向弯曲到规定角度时，试验设备应能准确停机。试验完成后应仔细观测试样，若无目视可见的裂纹，则评定为合格。

## 8.5　热双金属热弯曲试验

热双金属热弯曲试验按照 GB/T 8364—2008《热双金属热弯曲试验方法》进行。

### 8.5.1　试样

1）沿热双金属带材的轧制方向取样，使试样的长度方向与晶粒延伸方向一致。

2）试样采用直条形，外形平直，无明显的原始的不规则弯曲。

3）试样的厚度均匀一致，最大厚度与最小厚度之差，不大于最小厚度的 1%。

4）试样的最大宽度与最小宽度之差应不大于最小宽度的 2%。

5）试样经粗切或冲剪后，应通过机加工或锉加工对试样宽度进行修整，或采用纵向滚剪，去除粗加工可能造成试样的损伤及毛刺。可在测量长度以外作明确、永久的标记，但不应对以后的试验结果产生影响。

6）加工成形的试样应进行稳定化热处理，热处理温度如表 8-8 所示。或由供需双方协商，不允许对经热处理后的试样进行矫正。

**表 8-8　热双金属的稳定化热处理温度**

| 温度/℃ | 180～200 | 250～270 | 260～280 | 300～320 | 380～400 | 400～420 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 热双金属牌号 | 5J1413<br>5J1416 | 5J1306A/B<br>5J1309A/B<br>5J1411A/B<br>5J1417A/B | 5J14140<br>5J15120<br>5J20110 | 5J1017、5J1320A/B<br>5J1380、5J1325A/B<br>5J1480、5J1430A/B<br>5J1580、5J1433A/B<br>5J1435A/B<br>5J1440A/B<br>5J1445A/B | 5J10170 | 5J0756<br>5J1075 |

7）用精度为0.001mm，测量端平面直径不大于6.5mm的千分尺或其他相同等级精度的方法测定试样厚度。每件试样至少在其宽度中轴方向上测量3点，取其平均值。

8）试样的尺寸按表8-9的规定。

**表8-9　试样的尺寸**　　（单位：mm）

| 试样厚度 $\delta$ | 试样宽度 $b$ | 测量长度 $L$ | 试样总长度 $l$ |
|---|---|---|---|
| 0.60～<0.80 | 10 | 75 | 105 |
| 0.80～1.25 | 10 | 100 | 130 |

注：也可按下列要求制样：$8\leqslant b/\delta\leqslant 20$；$80\leqslant L/\delta\leqslant 200$；$l=L+30\text{mm}$。

## 8.5.2　试验设备

**1. 热双金属比弯曲试验装置**

1）试验测量装置由测挠仪、恒温浴槽和高灵敏电子接触指示器所组成，如图8-22所示。

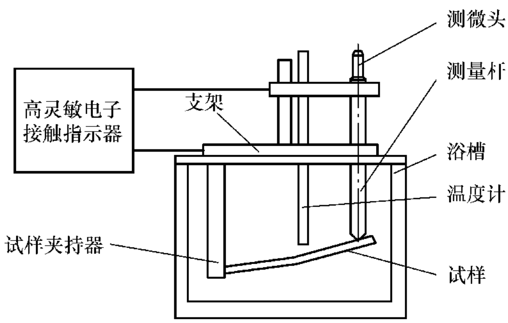



图8-22　试验测量装置

2）高灵敏电子接触指示器用来判别测量杆的尖端与试样表面接触、测量杆与试样表面相接触时，能迅速准确地发出信号。

3）测挠仪由4J36低膨胀合金制成的试样夹持器、支架、测量杆及测微头和温度计构成。

4）试样夹持器将试样一端夹紧，另一端自由，呈水平状态。

5）支架用于支撑、固定试样夹持器和测量杆，以避免测量过程中测量杆中心与试样夹持器端面之间的测量长度发生变化。

6）温度测量装置采用二等标准水银温度计或相等精度的温度计测定浴槽内各点温度，试样温度的测定应精确至±0.1℃。

7）浴槽是一种能搅拌的恒温箱或恒温液槽。浴槽中可放置试样架和可调节的加热电源，利用可调节的加热电源，使试样能保持在要求的温度下，沿整个试样长度上的温度差异不超过试验所用温度范围的0.5%，在整个试验过程中浴槽的温度变化在±0.3℃之内。浴槽宜用甲基硅油作介质，试样夹持器放置在浴槽内后，应保证试样浸入深度不小于80mm。

**2. 热双金属温曲率试验装置**

1）支座包括一个刀刃支座和一个半径不大于 0.2mm 的点状支座，如图 8-23 所示。测量长度 $L$（试样与一个支座接触的点到另一个支座接触的点之间的距离）必须精确到 0.1mm。当温度在 20～130℃时，测量距离 $L$ 的变化应小于 0.05mm。因此，有关支座的连接部件必须采用热膨胀系数小的 4J36 材料制成。接触杆位于两支座中心，其误差小于 ±0.05mm。

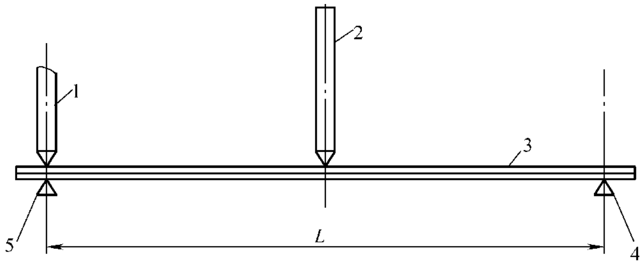



图 8-23　热双金属温曲率试验装置

1—压持器　2—接触杆　3—试样　4—点状支座　5—刃状支座

2）为了防止试样在测量过程中移动，必须采用压持器（见图 8-24）。在刀刃支座的一端，用一点状负荷杆在垂直方向上施加 0.25N 的力，把试样固定。为了限制试样横向移动，要求图 8-24 中尺寸 $B$ 不得比试样宽度大 0.5mm 以上。

3）使用深度千分尺或读数显微镜测量试样的挠度，要求从垂直由两个支座所组成的水平方向去接触试样。在使用深度千分尺时，用电子指示器接触不会对试样带来较大的影响，要求在各个试验温度下试样挠度的测量能精确至 0.01mm。挠度测量装置与试样支座相连接的部分应采用热膨胀系数小的 4J36 材料制成，以避免加热时测量装置与试样支座产生明显的位移。

4）浴槽与测量热双金属比弯曲所用装置相同。

**3. 热双金属弯曲常数试验**

1）热双金属弯曲常数试验方法采用悬臂梁法，由试样夹具、试样、电子指示器及位移测量装置组成一个闭合电路。室温时，调整测量位移装置的测量微器、测量杆与试样面自由端接触，电子指示器发出信号，利用曲率随温度变化的试样，作为闭合电路的开关来测量试样自由端的挠度变化。

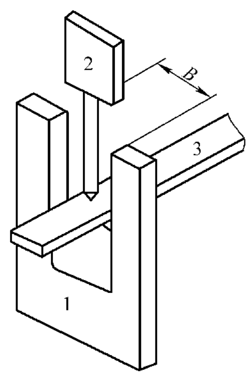



图 8-24　压持器

1—刃状支座　2—带负荷的压持器　3—试样　$B$—间隔距离

2）试样夹持应能将平直金属板一端夹紧，呈水平状态。

3）支架用于支撑、固定试样夹具和测量杆，以避免测量过程中测量杆中心与试样夹持端面之间的测量长度发生变化。

4）位移测量装置由测微器和测量杆组成，最小分度值不大于 0.001mm。

5）高灵敏度电子指示器用来判断测量杆和试样表面的接触，测量杆与试样表面接触时，能迅速准确地发出信号。

6）温度测量装置、浴槽与测量热双金属比弯曲所用装置相同。

## 8.5.3　试验内容及结果表示

### 1. 热双金属比弯曲试验

（1）试验原理　热双金属比弯曲试验方法采用悬臂梁法，由试样、试样夹持器、位移测量杆和电子接触指示器组成一个闭合回路。根据热双金属的曲率随温度变化的基本特性，将试样与位移测量杆作为闭合电路的开关来测量试样自由端的位移-挠度变化，如图 8-25 所示。

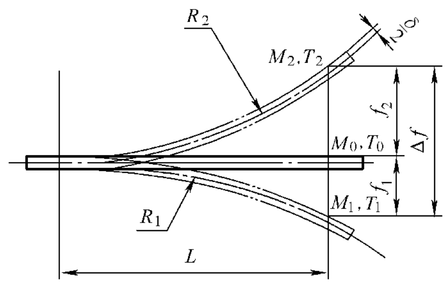



图 8-25　热双金属弯曲示意图

$\delta$—厚度（mm）　$L$—试验长度（mm）　$T_0$—平直状态温度（℃）

$T_1$、$T_2$—弯曲时温度（℃）　$R_1$、$R_2$—曲率半径（℃）

$M_0$—自由端中心线位置　$M_1$、$M_2$—弯曲时中心线位置

$f_1$、$f_2$—对应 $M_1$、$M_2$ 位置的挠度（mm）

$\Delta f = f_1 + f_2$（mm）

（2）试验步骤及结果表示　按下面程序进行：

1）试样经热处理后，表面产生氧化或存在污物，应仔细清除，以提高电子接触指示器的灵敏度。

2）用试样夹持器将平直的标准板（单金属材料制成）一端夹紧后，用千分尺测量夹持器侧面至测量杆中心的距离 $L$，该距离的测量精度为 0.05 mm。旋动测挠仪的测微头，测量基准点 $M_0$ 位置。

当试样夹持器是由下往上夹紧时，测微头读数 $D$ 与基准点 $M_0$ 的关系为

$$D = M_0$$

式中　$D$——测微头读数，单位为 mm；

$M_0$——基准点，单位为 mm。

当试样夹持器是由上往下夹紧时，测微头读数 $D$ 与基准点 $M_0$ 的关系为

$$M_0 = D + H - \delta$$

式中　$D$——测微头读数，单位为 mm；

$M_0$——基准点，单位为 mm；

$H$——标准板厚度，单位为 mm；

$\delta$——试样厚度，单位为 mm。

3）试样低膨胀层向上，安放在试样夹持器中夹紧。在一般情况下，试样厚度不大于 1mm 时夹紧力宜大于 196N（20kgf），试样厚度大于 1mm 时夹紧力宜大于 343N（35kgf）。

4）将测挠仪的试样部分放入温度为 20～25℃的浴槽内，待温度稳定后旋动测微头，测定温度 $T_1$ 时试样自由端的挠度 $f_1$，同时记录此刻试样的温度 $T_1$。当试样自由端位于水平位置以上时，$f_1$ 为正值；当试样自由端位于水平位置以下时，$f_1$ 为负值。

5）将测挠仪的试样部分放入温度为 125～130℃的浴槽内，按 4）规定测定 $f_2$ 为 $T_2$，并计算出 $\Delta f$。

6）最后将试样冷却至 $T_1$ 或附近，按 2）的规定复核试样自由端的挠度，并按下式计算比弯曲：

$$K=\frac{\delta}{T_2-T_1}\left(\frac{\Delta f+f_1}{L^2+(\Delta f+f_1)^2+(\Delta f+f_1)\delta}-\frac{f_1}{L^2+f_1^2+f\delta}\right)$$

式中　$K$——比弯曲，单位为℃$^{-1}$；

$L$——试样测量长度，单位为 mm；

$T_1$——测量初始温度，单位为℃；

$T_2$——测量结束温度，单位为℃；

$f_1$——温度为 $T_1$ 时的挠度，单位为 mm；

$\Delta f$——测量温度为 $T_2$ 和 $T_1$ 时试样的挠度差，单位为 mm；

$\delta$——试样厚度，单位为 mm。

再按下式计算比弯曲：

$$K=\frac{\Delta f\delta}{L^2+\Delta f^2+\Delta f\delta}\times\frac{1}{T_2-T_1}$$

式中　$K$——比弯曲，单位为℃$^{-1}$；

$L$——试样测量长度，单位为 mm；

$T_1$——测量初始温度，单位为℃；

$T_2$——测量结束温度，单位为℃；

$\Delta f$——测量温度为 $T_2$ 和 $T_1$ 时试样的挠度差，单位为 mm；

$\delta$——试样厚度，单位为 mm。

如果两种计算结果误差超过了 0.5%，则按供需双方商定在下列条件中选一项重作试验：①在相同温度范围内试验同一试样；②在不同温度范围内试验同一试样；③在相同温度范围内试验另一试样；④在不同温度范围内试验另一试样。

图 8-26 和图 8-27 为（$K/\delta$）-（$f_1/\Delta f$）分界曲线图。

如果按下式计算出 $K$ 值：

$$K=\frac{\Delta f\delta}{L^2+\Delta f^2+\Delta f\delta}\times\frac{1}{T_2-T_1}$$

使点（$K/\delta$，$f_1/\Delta f$）位于图 8-26 和图 8-27 分界曲线的上方，则应按下式计算 $K$ 值：

$$K=\frac{\delta}{T_2-T_1}\left(\frac{\Delta f+f_1}{L^2+(\Delta f+f_1)^2+(\Delta f+f_1)\delta}-\frac{f_1}{L^2+f_1^2+f\delta}\right)$$

仲裁试验按上式进行。

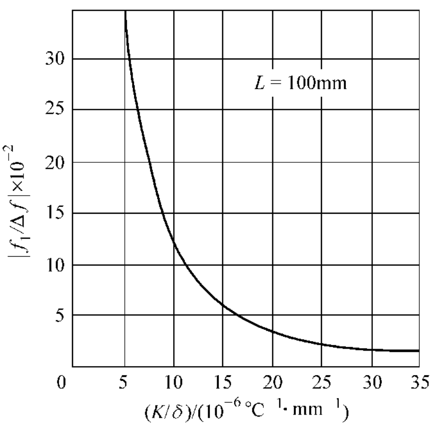



图 8-26　分界曲线图Ⅰ

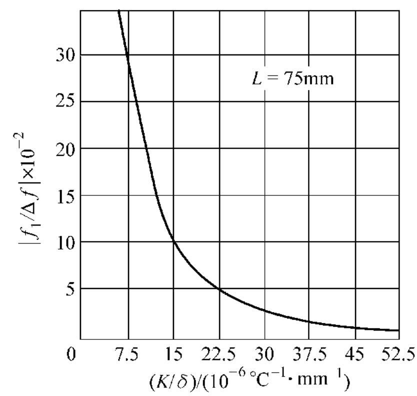



图 8-27　分界曲线图Ⅱ

**2. 热双金属温曲率试验**

（1）测量原理　将热双金属试样放置在相距一定的测量长度的两个锥形支座上，测量试样测量点的位移与温度变化的关系，通过计算得到温曲率 $F$。$F$ 可用下式计算：

$$F=\delta\,\frac{1/R_2-1/R_1}{T_2-T_1}$$

式中　$F$——温曲率，单位为℃$^{-1}$；

$\delta$——试样厚度，单位为 mm；

$T_1$、$T_2$——试验温度，单位为℃；

$R_1$、$R_2$——试样纵向中心线的曲率半径，单位为 mm，按下式计算：

$$\frac{1}{R}=\frac{8f}{L^2+4f\delta+4f^2}$$

式中　$L$——支点间距离，单位为 mm；

$\delta$——试样厚度，单位为 mm。

$f$——挠度（试样低膨胀面纵向中心线处测量点与试样支座连线间的垂直距离），单位为 mm，按图 8-28 测量。

（2）试验步骤及结果表示　按下面程序进行：

1）清除热处理之后试样表面上的污物和氧化色，以便提高电子指示的灵敏度。

2）把试样安放在试样架的支座上，高膨胀层在上，旋动千分尺在室温时测其原始位置。在试样的中央部位施加轻微的压力，然后把压力去掉。如果由于重复施加压力出现原始位置明显的变化，则应在试验之前找出其原因并加以纠正。

3）当开始条件满足要求后，观测室温的挠度和温度，并记录其结果。

4）把试样的温度调整到下一个选定的温度，待温度稳定后，测量和记录试样中央

或中央附近的温度。

5）测量和记录挠度。

6）在取得满意的温度测量和相应的挠度数据后，可调整到下一个设定的温度，按上述规范继续进行试验。

7）最后要在室温或室温附近作一次测量，目的是确定是否存在永久变形和机械事故以及它们影响温曲率的测量是否在精度要求范围内。如果影响是明显的，则按供需双方商定在下列条件中选一项重作试验：①在相同的温度范围内试验同一试样；②在不同的温度范围内试验同一试样；③在相同的温度范围内试验另一试样；④在不同的温度范围内试验另一试样。

**3. 热双金属弯曲常数试验**

（1）测量原理　一端固定的热双金属片，其单位厚度和单位长度在温度变化 1℃时，自由端挠度的变量称为热双金属弯曲常数 $K_c$。热双金属弯曲常数试验方法采用悬臂梁法，由试样夹具、试样、电子指示器及位移测量装置组成一个闭合电路，如图 8-29 所示。室温时调整测量位移装置的测微器、测量杆与试样面自由端接触，电子指示器发出信号，利用曲率随温度变化的试样，作为闭合电路的开关来测量试样自由端的挠度变化。

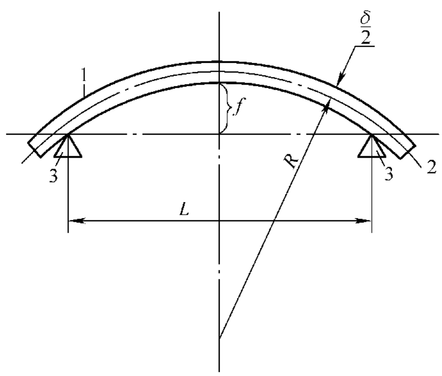



图 8-28　挠度的测量

1—试样　2—中心线　3—支点　R—试样纵向中心线的曲率半径（mm）　δ—试样厚度（mm）　L—支点间距离（mm）　f—点状支点时的挠度（mm）

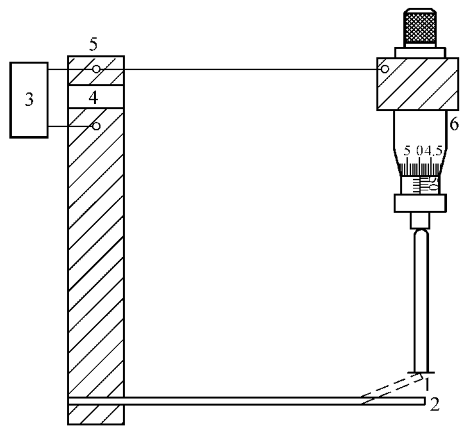



图 8-29　弯曲常数测量图

1—试样高温位置　2—试样室温位置　3—电子指示器　4—绝缘体　5—试样夹具　6—位移测量千分尺

（2）试验步骤及结果表示　按下面程序进行：

1）试样尺寸应符合表 8-10 的规定，试样的形状如图 8-30 所示。

**表 8-10　弯曲常数测量用试样的尺寸**　（单位：mm）

| 试样厚度 δ | 试样长度 l | 工作长度 L | 试样宽度 b |
|---|---|---|---|
| 0.25 ~ <0.30 | 65 | 40 | 5 |
| 0.30 ~ <0.40 | 75 | 50 | |
| 0.40 ~0.70 | 100 | 75 | |
| >0.70 ~1.00 | 125 | 100 | 10 |
| >1.00 ~1.20 | 150 | 125 | |

2）用试样夹具将平直金属板夹紧，按其待测试样厚度调整测量杆中心线至平直金属固定端的水平距离，等于试样的工作长度，并测量出水平状态位置。

3）清除热处理后试样夹持端面和测量杆接触部位表面的氧化色，将试样低膨胀层向上，用试样夹具夹紧，并测出试样工作长度。

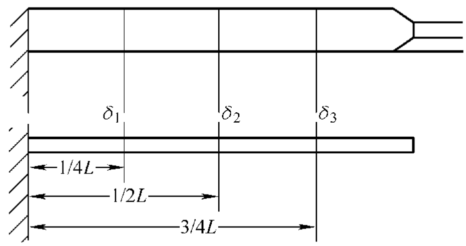



图 8-30　试样尺寸测量图

4）将装有试样的试样夹具放入浴槽内，调整油温。当电子指示器显示试样达到水平位置时，记下此时的温度，为试样水平位置的温度。

5）用时间约 2h 从室温加热到 100℃的加热速度缓慢加热，至少记下室温、50℃、75℃和 100℃时自由端的位置。

6）截面均匀的一端固定，另一端自由的热双金属平直条状试样，弯曲常数用下式计算：

$$K_c = K'_c \frac{\delta}{L^2}$$

式中　$L$——试样的工作长度，单位为 mm；

$K_c$——热双金属弯曲常数，单位为℃$^{-1}$；

$\delta$——试样的厚度，单位为 mm；

$K'_c$——拟合直线斜率，单位为 mm/℃，按下式求得：

$$K'_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i \sum_{i=1}^{n} y_i - n \sum_{i=1}^{n} T_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^{n} T_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^{n} T_i^2}$$

式中　$n$——测量点数；

$T_i$——各点测量温度，单位为℃；

$y_i$——相对测量温度 $T_i$ 时的对应挠度，单位为 mm。

## 8.6　热双金属横向弯曲试验

热双金属横向弯曲试验按照 GB/T 24298—2009《热双金属横向弯曲试验方法》进行。

### 8.6.1　试样

试样应沿带材的冷轧方向横向切割。试样的宽度方向应无毛刺、翘边等影响测量的缺陷。切取试样时，不应改变原有的横向弯曲曲率。试样纵向应平直，特别是与垫块接触的 6mm 在纵向应是平直的。试样切割后应放置 10min 后再进行测量，以便其形状稳定。

试样宽度为待测带材的宽度，长度为 4 ~ 8mm。

## 8.6.2　试验设备

**1. 固定装置**

测量横向弯曲的典型固定装置如图 8-31 所示。装置由底座、基准平面、支架、导轨、深度千分尺、平行垫块和电接触指示器构成，底座的上端面为基准平面，上方是移动导轨。该轨道与基准平面平行，在轨道上装配一个可移动的支架。

**2. 深度千分尺**

深度千分尺最小分度值应不大于 0.002mm。其测量杆端部应制成球面或尖头，固定在移动支架上，能在导轨上沿试样宽度方向进行移动寻找试样的最高点。

**3. 电接触指示器**

采用高灵敏、低电流电接触指示器，以判别深度千分尺测量端的接触状况。当深度千分尺测量端与试样或平行垫块接触时发出电信号。

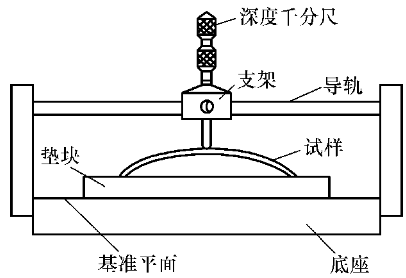



图 8-31　固定装置

**4. 平行垫块**

平行垫块承载被测试样的淬火钢，尺寸为 6mm × 10mm × 150mm。在深度千分尺沿平行垫块长度的移动区间内，其测量端至平行垫块的距离偏差应不大于 0.002mm。

## 8.6.3　试验内容及结果表示

**1. 测量原理**

横向弯曲的测量原理如图 8-32 所示。测量热双金属试样整个宽度（$L$）距平面的偏差（弦高 $c$）：将试样放在专用测量装置的垫块上，凸面向上，用深度千分尺测量出试样最高点到垫块平面的距离。通过公式计算得到试样横向弯曲和横向弯曲曲率半径。正常情况下，最高点在（或接近）试样的中心。

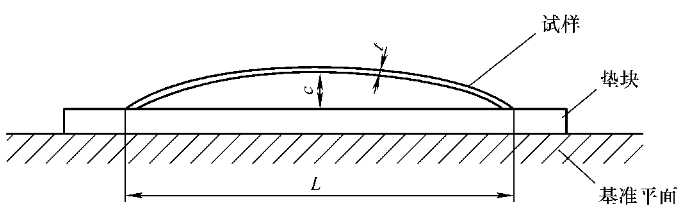



图 8-32　测量原理

$L$—试样整个宽度（mm）　$c$—弦高（mm）　$t$—试样厚度（mm）

**2. 试验步骤**

1）将平行垫块 6mm 宽的平面置于基准面之上，移至深度千分尺的下方，其长度方

向与支架移动方向一致。旋动深度千分尺直到电接触指示器发出信号，显示测量端部刚好与平行垫块上表面接触，记录此时深度千分尺的读数为基点（$B$）。

2）旋转深度千分尺以方便试样放入。将试样居中放置在平行垫块上，凸面向上，试样宽度的两侧与平行垫块接触，注意防止试样倾斜或与平行垫块接触不良。然后将深度千分尺在导轨上左右滑动寻找试样的最高点（一般在试样的中间位置），记录试样最高点处深度千分尺的读数（$H$）。

3）用球面或尖头外径千分尺测量试样的厚度（$t$），球面或尖头外径、千分尺的最小分度值应不大于0.01mm。

4）所有测量应在24℃ ±2℃的温度条件下进行，试样也应在该温度下放置30min后再进行测量。

**3. 结果表示**

1）横向弯曲按下式计算：

$$C = B - H - t$$

式中　$C$——横向弯曲，单位为mm；

$B$——深度千分尺在平行垫块基点的读数，单位为mm；

$H$——深度千分尺在试样最高点处的读数，单位为mm；

$t$——试样厚度，单位为mm。

2）横向弯曲曲率半径下式计算：

$$R = \frac{L^2}{8C} + \frac{C}{2}$$

式中　$R$——横向弯曲曲率半径，单位为mm；

$C$——横向弯曲，单位为mm；

$L$——试样宽度，单位为mm。

## 8.7　焊接接头弯曲试验

焊接接头弯曲试验按照GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行。

### 8.7.1　试样

**1. 对接接头正弯试样**

对接接头正弯试样是指焊缝表面为受拉面的试样，如图8-33和图8-34所示。试样厚度$t_s$应等于焊接接头处母材的厚度。当要求对整个厚度（30mm以上）进行试验时，可以截取若干个试样覆盖整个厚度。在这种情况下，试样在焊接接头厚度方向的位置应做标识。

**2. 对接接头背弯试样**

对接接头背弯试样是指焊缝根部为受拉面的试样，如图8-33和图8-34所示。试样厚度$t_s$应等于焊接接头处母材的厚度。当要求对整个厚度（30mm以上）进行试验时，可以截取若干个试样覆盖整个厚度。在这种情况下，试样在焊接接头厚度方向的位置应

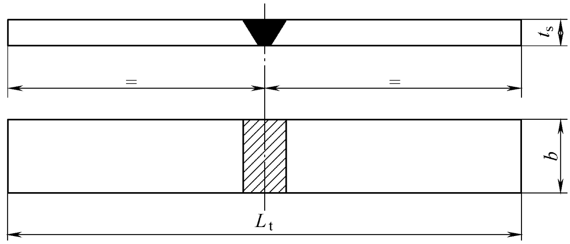



图 8-33　对接接头横向弯曲试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）

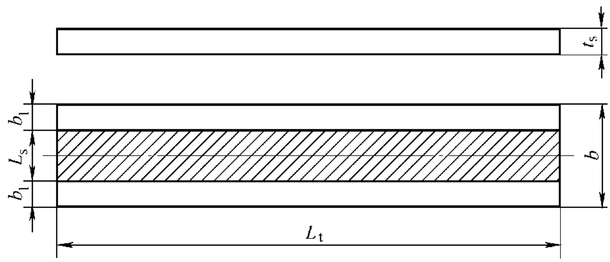



图 8-34　对接接头纵向弯曲试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$L_s$—加工后试样上焊缝的最大宽度（mm）

$b$—试样宽度（mm）　$b_1$—熔合线外宽度（mm）

注：$b_1=(b-L_s)/2$。

做标识。

**3. 对接接头侧弯试样**

对接接头侧弯试样是指焊缝横截面为受拉面的试样，如图 8-35 所示。试样宽度 $b$ 应等于焊接接头处母材的厚度。试样厚度 $t_s$ 至少应为 10mm ± 0. 5mm，而且试样宽度应大于或等于试样厚度的 1. 5 倍。当接头厚度超过 40mm 时，允许从焊接接头截取几个试样代替一个全厚度试样。试样宽度 $b$ 的范围为 20 ~ 40 mm。在这种情况下，试样在焊接接头厚度方向的位置应做标识。

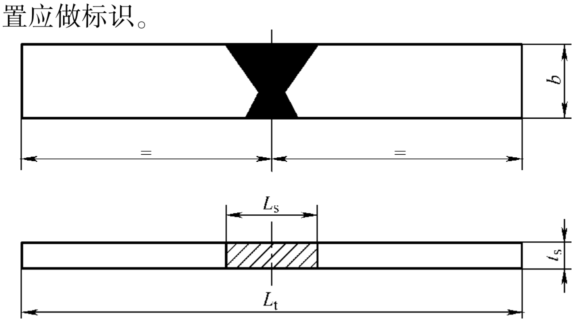



图 8-35　对接接头侧弯试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$L_s$—加工后试样上焊缝的最大宽度（mm）

$b$—试样宽度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）

**4. 带堆焊层正弯试样**

带堆焊层正弯试样是指堆焊层表面为受拉面的试样，如图 8-36 所示。试样厚度 $t_s$ 应等于基材厚度加上堆焊层的厚度，最大为 30 mm。当基材厚度加上堆焊层的厚度超过 30mm 时，允许去除部分基材使加工好的试样厚度 $t_s$ 符合相关要求。

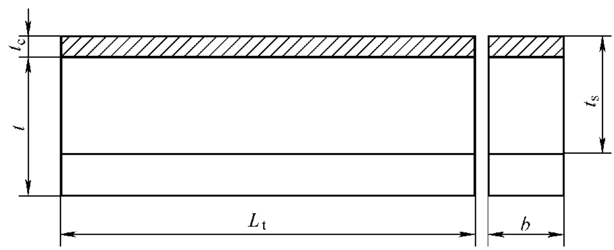



图 8-36　带堆焊层正弯试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$b$—试样宽度（mm）
$t$—基材厚度（mm）　$t_c$—堆焊层厚度（mm）

**5. 带堆焊层侧弯试样**

带堆焊层侧弯试样是指堆焊层的横截面为受拉面的试样，如图 8-37 所示。试样宽度 $b$ 应等于基材厚度加上堆焊层的厚度，最大为 30mm。试样厚度 $t_s$ 至少应为 10mm ± 0. 5mm，而且试样宽度应大于或等于试样厚度的 1. 5 倍。当基材厚度加上堆焊层的厚度超过 30mm 时，允许去除部分母材使加工好的试样宽度 $b$ 符合相关要求。

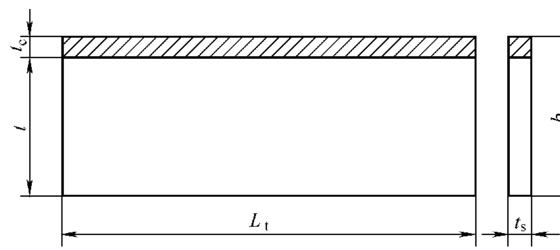



图 8-37　带堆焊层侧弯试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$b$—试样宽度（mm）
$t$—基材厚度（mm）　$t_c$—堆焊层厚度（mm）

**6. 带堆焊层对接接头正弯试样**

带堆焊层对接接头正弯试样是指对接接头堆焊层表面为受拉面的试样，如图 8-38 所示。试样厚度 $t_s$ 应等于基材厚度加上堆焊层的厚度。在这种情况下，焊缝应位于试样的中心或适合于试验的位置。

**7. 带堆焊层对接接头侧弯试样**

带堆焊层对接接头侧弯试样是指对接接头横截面为受拉面的试样，如图 8-39 所示。试样宽度 $b$ 应等于基材厚度加上堆焊层的厚度。试样厚度 $t_s$ 至少应为 10mm ± 0. 5mm，而且试样宽度应大于或等于试样厚度的 1. 5 倍。在这种情况下，焊缝应位于试样的中心或适合于试验的位置。

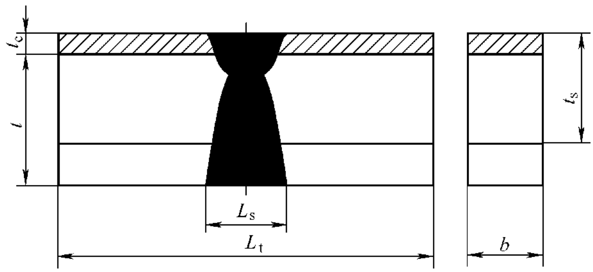



图 8-38　带堆焊层对接接头正弯试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$b$—试样宽度（mm）

$t$—基材厚度（mm）　$t_c$—堆焊层厚度（mm）

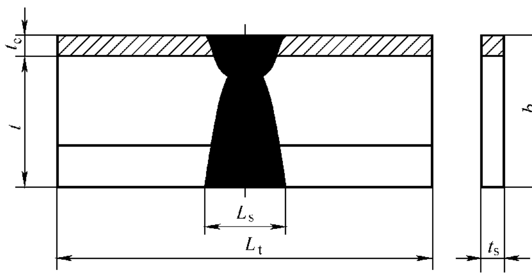



图 8-39　带堆焊层对接接头侧弯试样

$L_t$—试样总长度（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$b$—试样宽度（mm）

$t$—基材厚度（mm）　$t_c$—堆焊层厚度（mm）

注：$b=t+t_c$。

**8. 试样的尺寸**

（1）长度　试样的长度 $L_t$ 应满足 $L_t \geqslant 1\text{mm}+2R$，其中，$R$ 为辊筒半径（单位为 mm）。

（2）宽度　对于横向正弯和背弯试样，应满足下列条件：

1）钢板试样宽度 $b$ 应不小于 $1.5t_s$，最小为 20mm。

2）铝、铜及其合金板试样宽度 $b$ 应不小于 $2t_s$，最小为 20mm。

3）管径不小于 50mm 时，管试样宽度 $b$ 最小应为 $t+0.1D$ 且最小为 8mm。

4）管径大于 50mm 时，管试样宽度 $b$ 最小应为 $t+0.05D$，最小为 8mm 且最大为 40mm。

5）外径 $D$ 大于 25 倍的管壁厚，试样的截取按板材要求。

6）对于侧弯试样，试样宽度 $b$ 一般等于焊接接头处母材厚度。

7）对于纵向弯曲试样，试样宽度 $b$ 如表 8-11 所示。

（3）棱角　试样拉伸面棱角应加工成圆角，其半径 $r$ 不超过 $0.2t_s$，最大为 3mm。

试样加工的最后工序应采用机加工或磨削，其目的是为了避免材料的表面变形硬化或过热。试样表面应没有横向划痕或切痕，不得除去咬边。

表 8-11　纵向弯曲试样宽度　（单位：mm）

| 材　　料 | 试样厚度 $t_s$ | 试样宽度 $b$ |
|---|---|---|
| 钢 | ≤20 | $L_s+2\times10$ |
| | >20 | $L_s+2\times15$ |
| 铝、铜及其合金 | ≤20 | $L_s+2\times15$ |
| | >20 | $L_s+2\times25$ |

## 8.7.2　试验设备

试验设备包括压头和辊筒。压头的直径 $d$ 应依据相关标准确定，辊筒的直径至少为 20mm。

## 8.7.3　试验内容及结果表示

**1. 圆形压头弯曲**

圆形压头弯曲如图 8-40 ~ 图 8-42 所示。把试样放在两个平行的辊筒上进行试验，焊缝应在两个辊筒间中心线位置，纵向弯曲除外。在两个辊筒间中点，即焊缝的轴线，垂直于试样表面通过压头施加载荷（三点弯曲），使试样逐渐连续地弯曲。

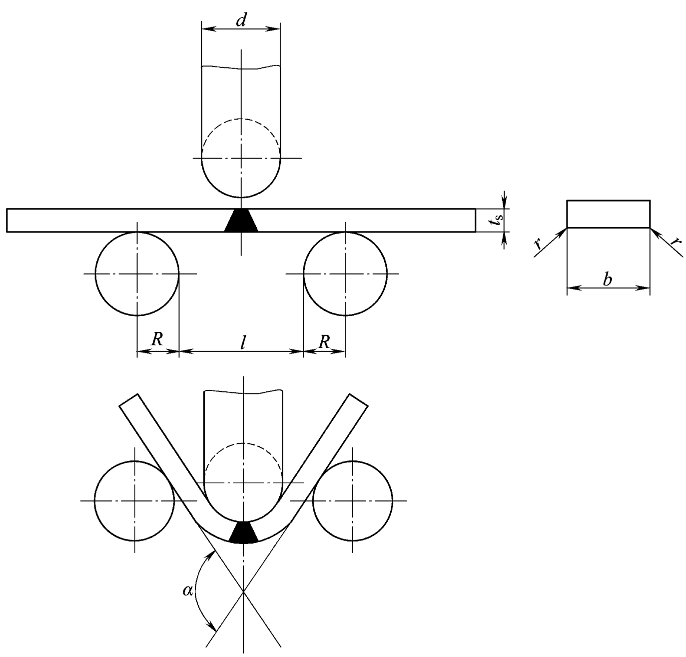



图 8-40　横向正弯或背弯

$l$—辊筒间距离（mm）　$R$—辊筒半径（mm）　$d$—压头直径（mm）　$b$—试样宽度（mm）

$r$—试样棱角半径（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$\alpha$—弯曲角度（°）

注：$d+2t_s<l\leqslant d+3t_s$。

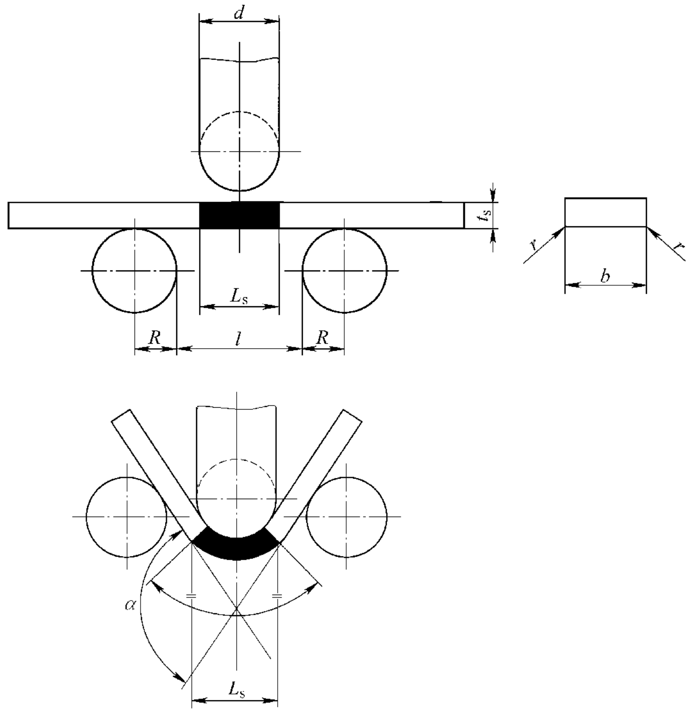



图 8-41　横向侧弯

$L_s$—加工后试样上焊缝的最大宽度（mm）　$l$—辊筒间距离（mm）　$R$—辊筒半径（mm）

$d$—压头直径（mm）　$b$—试样宽度（mm）　$r$—试样棱角半径（mm）

$t_s$—试样厚度（mm）　$\alpha$—弯曲角度（°）

注：$d+2t_s<l\leqslant d+3t_s$；$d\geqslant1.3L_s-t_s$。

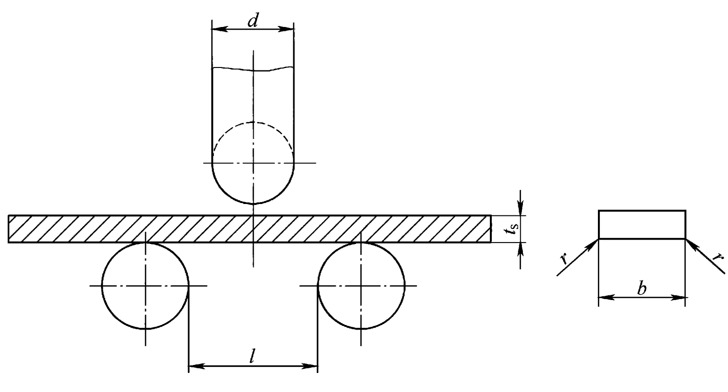



图 8-42　纵向弯曲

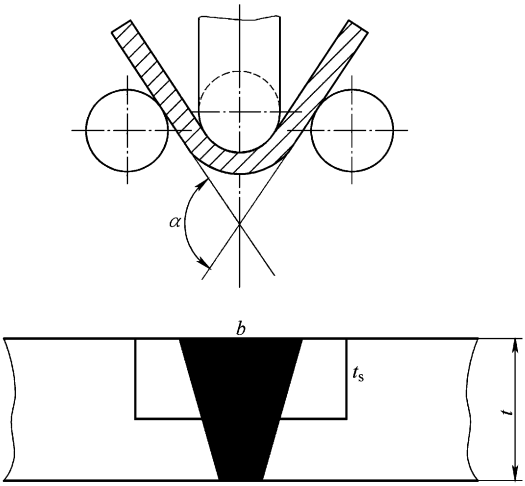



图 8-42　纵向弯曲（续）

$l$—辊筒间距离（mm）　$d$—压头直径（mm）　$t$—试样厚度（mm）　$b$—试样宽度（mm）

$r$—试样棱角半径（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$\alpha$—弯曲角度（°）

注：$d+2t_s<l\leqslant d+3t_s$。

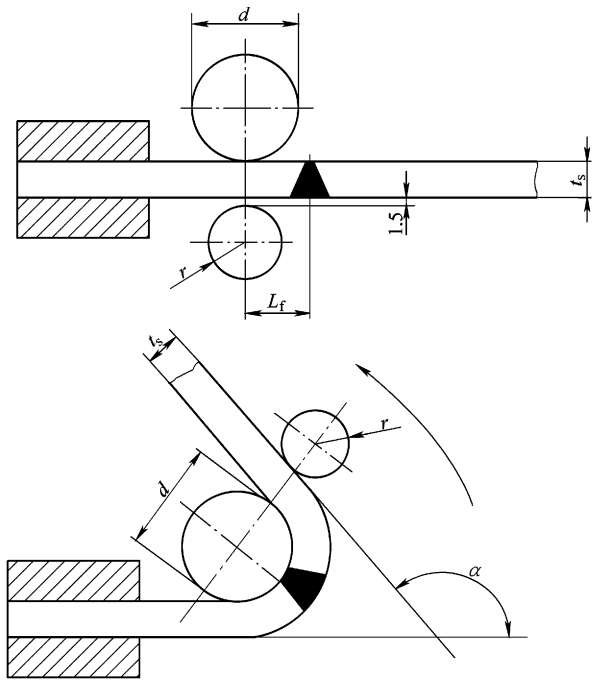



图 8-43　辊筒弯曲

$L_f$—焊缝中心线与试样和辊筒接角点间初始距离（mm）　$d$—压头直径（mm）

$r$—试样棱角半径（mm）　$t_s$—试样厚度（mm）　$\alpha$—弯曲角度（°）

注：$0.7d<L_f<0.9d$。

**2. 辊筒弯曲**

辊筒弯曲（见图 8-43）是另一种试验方法，用于铝合金和异种材料接头。对于异种材料接头，其焊缝金属或一侧母材的屈服强度或规定塑性延伸强度低于母材。将试样的一端牢固地卡紧在两个平行辊筒的试验装置内进行试验，通过外辊筒沿以内辊筒轴线为中心的圆弧转动，向试样施加载荷，使试样逐渐连续地弯曲。

**3. 结果表示**

1）弯曲结束后，试样的外表面和侧面都应进行检验。

2）依据相关标准对弯曲试样进行评定并记录。

3）除另有规定外，在试样表面上小于 3mm 长的缺欠应判为合格。

# 8.8　塑料弯曲试验

塑料弯曲试验按照 GB/T 9341—2008《塑料　弯曲性能的测定》进行。

## 8.8.1　试样

**1. 试验材料**

1）热塑性模塑和挤塑材料，包括填充的和增强的未填充材料以及硬质热塑性板材。

2）热固性模塑材料，包括填充和增强材料以及热固性板材。

**2. 试样的尺寸**

（1）推荐试样尺寸　长度 $l$ 为 80mm ± 2mm，宽度 $b$ 为 10.0mm ± 0.2mm，厚度 $h$ 为 4.0mm ± 0.2mm。对于任一试样，其中部 1/3 的长度内各处厚度与厚度平均值的偏差应不大于 2%，宽度与平均值的偏差不应大于 3%。试样截面应是矩形且无倒角。

（2）其他试样尺寸　长度与厚度的比值为 19 ~ 21，试样宽度应采用表 8-12 给出的规定值。

**表 8-12　与试样厚度 $h$ 相关的宽度值 $b$**　（单位：mm）

| 公称厚度 $h$ | 宽度 $b$① | 公称厚度 $h$ | 宽度 $b$① |
|---|---|---|---|
| >1 ~ 3 | 25.0 ± 0.5 | >10 ~ 20 | 20.0 ± 0.5 |
| >3 ~ 5 | 10.0 ± 0.5 | >20 ~ 35 | 35.0 ± 0.5 |
| >5 ~ 10 | 15.0 ± 0.5 | >35 ~ 50 | 50.0 ± 0.5 |

① 含有粗粒填料的材料，其最小宽度应为 30mm。

**3. 各向异性材料**

1）这类材料的物理性能（例如弹性）与方向有关，应使所选择的试样承受弯曲应力的方向与其产品（模塑制品、板、管等）在使用时承受弯曲应力的方向相同或相近。如果已知该方向，试样和设计的最终产品之间的关系将决定是否使用标准的试样。

试样的取样位置、取样方向和尺寸，有时对测试结果有很大的影响。

2）当材料的弯曲特性在两个主要方向上显示出有很大差别时，应在这两个方向上进行试验，并记录试样的取向与主方向的关系，如图 8-44 所示。

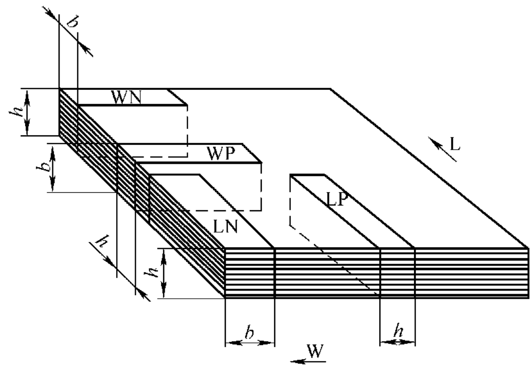



图 8-44　相对于产品方向和施力方向的试样位置

注：L 表示产品的长度方向；W 表示产品的宽度方向。试样位置符号表示意义如下：

| 试样位置 | 产品方向 | 施力方向 |
|---|---|---|
| LN | 长度 | 垂直层压面 |
| WN | 宽度 | |
| LP | 长度 | 平行层压面 |
| WP | 宽度 | |

**4. 试样制备**

（1）模塑和挤塑料　试样应根据相关的材料标准进行制备。当没有材料标准或其他规定时，则可根据需要，按照 GB/T 9352、GB/T 17037.1、GB/T 5471 的要求直接模压或注射试样。

（2）板材　试样应根据 ISO 2818：1994 的规定从片材上机加工制取。

**5. 试样检查**

1）试样不可扭曲，相对的表面应互相平行，相邻的表面应互相垂直。所有的表面和边缘应无刮痕、麻点、凹陷和飞边。

2）借助直尺、规尺和平板，目视检查试样是否符合上述要求，并用游标卡尺测量。

3）试验前，应剔除测量或观察到的有一项或多项不符合上述要求的试样，或将其加工到合适的尺寸和形状。

4）为了便于脱模，注射试样通常有 1°～2°的脱模角，因此模塑试样的侧面通常不完全平行。

**6. 试样数量**

1）在每一试验方向上至少应测试 5 个试样。如果要求平均值要有更高的精密度，试样数量可能会超过 5 个，具体的试样数量可用置信区间进行估算。

2）直接注射的试样，应至少测试 5 个试样。

3）试样在跨度中部 1/3 外断裂的试验结果应予作废，并应重新取样进行试验。

**7. 状态调节**

试样应按其材料标准的规定进行状态调节，另有商定（如高温或低温试验）除外。若无相关标准时，应从 GB/T 2918 中选择最合适的条件进行状态调节。GB/T 2918 中推荐的状态调节环境为 23/50，只有当知道材料的弯曲性能不受湿度影响时，才不需要控制湿度。

## 8.8.2　试验设备

**1. 试验机**

试验机应符合 GB/T 17200 的要求。

**2. 支座和压头**

两个支座和中心压头的位置情况如图 8-45 所示。在试样宽度方向上，支座和压头之间的平行度误差应在 ±0.2mm 以内。

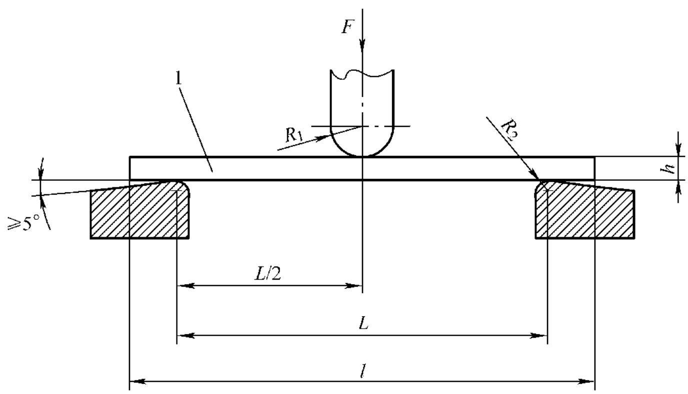



图 8-45　支座和压头

1—试样　$h$—试样厚度　$F$—施加力　$l$—试样长度　$R_1$—压头半径　$R_2$—支座半径　$L$—支座间跨距的长度

注：$R_1$ = 5.0mm ± 0.1mm；当试样厚度 ≤3mm 时，$R_2$ = 2.0mm ± 0.2mm，当试样厚度 > 3mm 时，$R_2$ = 5.0mm ± 0.2mm；跨度 $L$ 应可调节。

**3. 负荷和挠度指示装置**

力值的示值误差不应超过实际值的 1%，挠度的示值误差不应超过实际值的 1%。

## 8.8.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）试验应在受试材料的标准规定的环境中进行。若无相关标准时，应从 GB/T 2918中选择最合适的环境进行试验。另有商定的，如高温或低温试验除外。

2）测量试样中部的宽度 $b$ 精确到 0.1mm；厚度 $h$ 精确到 0.01mm；计算一组试样厚度的

平均值 $\overline{h}$。剔除厚度超过平均厚度允许偏差 ±2% 的试样，并用随机选取的试样来代替。

3）按下式调节跨度：

$$L=(16\pm1)\overline{h}$$

式中　$L$——支座间跨距的长度，单位为 mm；

$\overline{h}$——试样厚度的平均值，单位为 mm。

4）试验前试样不应过分受力。为避免应力-应变曲线的起始部分出现弯曲，有必要施加预应力。在测量弯曲弹性模量时，试验开始时试样所受的弯曲应力 $\sigma_{f0}$（见图 8-46）应该为正值，且处于下列范围内：

$$0\leqslant\sigma_{f0}\leqslant5\times10^{-4}E_f$$

上述不等式中，$E_f$ 是弯曲弹性模量，单位为 MPa。

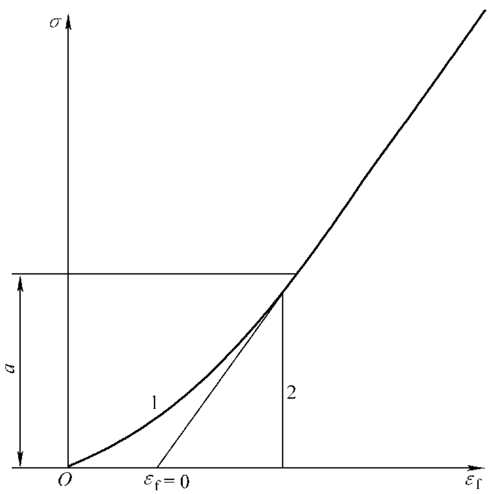



图 8-46　带有曲线起始部分和测定零应变点的应力-应变曲线示例

1—应力-应变曲线的起始部分区域　2—应力-应变曲线的起始部分的预应力

注：$a\leqslant5\times10^{-4}E_f$ 或 $\leqslant10^{-2}\sigma_f$。

5）按受试材料标准的规定设置试验速度，若无相关标准，从表 8-13 中选一速度值，使弯曲应变速率尽可能接近 1%/min。对于推荐试样，给定的试验速度为 2mm/min。

**表 8-13　试验速度的推荐值**

| 速度 $v$/(mm/min) | 允许偏差(%) | 速度 $v$/(mm/min) | 允许偏差(%) |
|---|---|---|---|
| 1① | ±20② | 50 | ±10 |
| 2 | ±20② | 100 | ±10 |
| 5 | ±20 | 200 | ±10 |
| 10 | ±20 | 500 | ±10 |
| 20 | ±10 | | |

① 厚度在 1～3.5mm 之间的试样，用最低速度。

② 速度 1mm/min 和 2mm/min 的允许偏差低于 GB/T 17200—2008 的规定。

6）把试样对称地放在两个支座上，并于跨度中心施加力。

7）记录试验过程中施加的力和相应的挠度，若有条件，应用自动记录装置来执行这一操作过程，以便得到完整的应力-应变曲线图。

**2. 结果表示**

1）弯曲应力按下式计算：

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^3}$$

式中　$\sigma_f$——弯曲应力，单位为 MPa；
$F$——施加的力，单位为 N；
$L$——跨度，单位为 mm；
$b$——试样宽度，单位为 mm；
$h$——试样厚度，单位为 mm。

2）弯曲应变按下式计算：

$$\varepsilon_f = \frac{6fh}{L^2}$$

式中　$\varepsilon_f$——弯曲应变（%）；
$f$——挠度，单位为 mm；
$h$——试样厚度，单位为 mm；
$L$——跨度，单位为 mm。

3）计算弯曲模量时，先计算出与弯曲应变对应的挠度，按下式进行：

$$f_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} (i = 1, 2)$$

式中　$f_i$——单个挠度，单位为 mm；
$\varepsilon_{fi}$——相应的弯曲应变（%）；
$L$——跨度，单位为 mm；
$h$——试样厚度，单位为 mm。

再根据下式计算弯曲应变模量：

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$$

式中　$E_f$——弯曲模量，单位为 MPa；
$\sigma_{f1}$——挠度为 $f_1$ 时的弯曲应力，单位为 MPa；
$\sigma_{f2}$——挠度为 $f_2$ 时的弯曲应力，单位为 MPa；
$\varepsilon_{f1}$——与 $f_1$ 相应的弯曲应变（%）；
$\varepsilon_{f2}$——与 $f_2$ 相应的弯曲应变（%）。

## 8.9　纤维增强塑料弯曲试验

纤维增强塑料弯曲试验按照 GB/T 1449—2005《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》

进行。

## 8.9.1　试样

1）试样形状和尺寸如图 8-47 和表 8-14 所示。

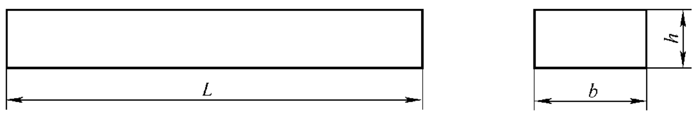



图 8-47　试样的形状

**表 8-14　试样的尺寸**　（单位：mm）

| 厚　度　$h$ | 纤维增强热塑性塑料宽度 $b$ | 纤维增强热固性塑料宽度 $b$ | 最小长度 $L_{min}$ |
|---|---|---|---|
| >1 ~3 | 25 ±0.5 | 15 ±0.5 | 20$h$ |
| >3 ~5 | 10 ±0.5 | 15 ±0.5 | |
| >5 ~10 | 15 ±0.5 | 15 ±0.5 | |
| >10 ~20 | 20 ±0.5 | 30 ±0.5 | |
| >20 ~35 | 35 ±0.5 | 50 ±0.5 | |
| >35 ~50 | 50 ±0.5 | 80 ±0.5 | |

2）仲裁试样的尺寸如表 8-15 所示。

**表 8-15　仲裁试样的尺寸**　（单位：mm）

| 材　　料 | 长　度　$L$ | 宽　度　$b$ | 厚　度　$h$ |
|---|---|---|---|
| 纤维增强热塑性塑料 | ≥80 | 10 ±0.5 | 4 ±0.2 |
| 纤维增强热固性塑料 | ≥80 | 15 ±0.5 | 4 ±0.2 |
| 短切纤维增强塑料 | ≥120 | 15 ±0.5 | 6 ±0.2 |

## 8.9.2　试验设备

**1. 试验机**

1）试验机载荷相对误差不应超过 ±1%。

2）机械式和液压式试验机使用吨位的选择应使试样施加载荷落在满载的 10% ~90% 范围内（尽量落在满载的一边），且不应小于试验机最大吨位的 4%。

3）能获得恒定的试验速度。当试验速度不大于 10mm/min 时，误差不应超过 20%；当试验速度大于 10mm/min 时，误差不应超过 10%。

4）电子拉伸试验机和伺服液压式试验机使用吨位的选择应参照该试验机的说明书。

5）测量变形的仪器仪表相对误差均不应超过 ±1%。

**2. 弯曲试验装置**

弯曲试验装置如图 8-48 所示。

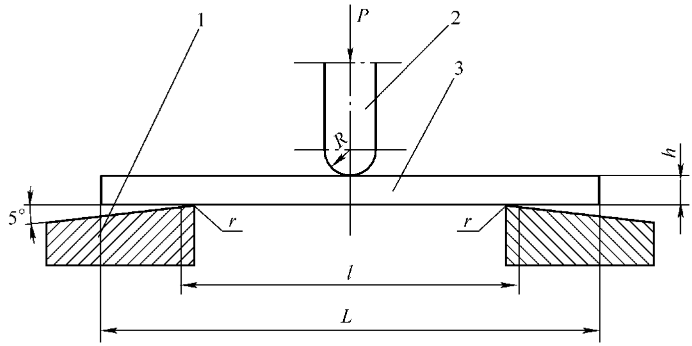



图 8-48　弯曲试验装置

1—试样支座　2—加载上压头　3—试样

*P*—载荷　*L*—试样长度　*h*—试样厚度　*R*—加载上压头圆角半径　*r*—支座圆角半径　*l*—跨距

注：加载上压头应为圆柱面，其半径 $R=5\text{mm}\pm0.01\text{mm}$；试样厚度 $h>3\text{mm}$ 时，$r=2\text{mm}\pm0.2\text{mm}$，试样厚度 $h\leqslant3$ mm 时，$r=0.5\text{mm}\pm0.2\text{mm}$，若试样出现明显支座压痕，*r* 应改为 2mm。

## 8.9.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）将合格试样编号、画线，测量试样中间的 1/3 跨距任意 3 点的宽度和厚度，取算术平均值。

2）调节跨距 *l* 及上压头的位置，准确至 0.5mm。加载上压头位于支座中间，且使上压头和支座的圆柱面轴线相平行。

跨距 *l* 可按试样厚度 *h* 按下式换算：

$$l=(16\pm1)h$$

式中　*l*——跨距，单位为 mm；

　　*h*——试样厚度，单位为 mm。

很厚的试样，为避免层间剪切破坏，跨厚比 *l/h* 可取大于 16，如 32、40。对很薄的试样，为使其载荷落在试验机许可的载荷容量范围内，跨厚比 *l/h* 可取小于 16，如 10。

3）标记试样受拉面，将试样对称地放在两支座上。必要时，在试样上表面与加载压头间放置薄片或薄垫块，防止试样受压失效。

4）将测量变形的仪表置于跨距中点处，与试样下表面接触。施加初载（约为破坏载荷的 5%），检查和调整仪表，使整个系统处于正常状态。

5）加载：①常规试验速度为 10mm/min，仲裁试验速度为 *h*/2 mm/min；②测定弯曲弹性模量及载荷-挠度曲线时，试验速度一般为 2mm/min。

6）测定弯曲强度时，连续加载。在挠度等于 1.5 倍试样厚度下呈现破坏的材料，记录最大载荷或破坏载荷；在挠度等于 1.5 倍试样厚度下不呈现破坏的材料，记录该挠度下的载荷。

7）测定弯曲弹性模量及载荷-挠度曲线时，无自动记录装置可分级加载，级差为破

坏载荷的 5% ~10%（测定弯曲弹性模量时，至少分 5 级加载，所施加的最大载荷不宜超过破坏载荷的 50%。一般至少重复 3 次，取其 2 次稳定的变形增量）。记录各级载荷及相应的挠度。

8）测定弯曲弹性模量及载荷-挠度曲线时，有自动记录装置可连续加载。

9）试样呈层间剪切破坏，有明显内部缺陷或在试样中间 1/3 以外破坏的应予作废。同批有效试样不足 5 个时，应重作试验。

**2. 结果表示**

1）弯曲强度按下式计算：

$$\sigma_{\mathrm{f}} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

式中　$\sigma_{\mathrm{f}}$——弯曲强度（或挠度为 1.5 倍试样厚度时的弯曲应力），单位为 MPa；

$F$——破坏载荷（或最大载荷，或挠度为 1.5 倍试样厚度时的载荷），单位为 N；

$l$——跨距，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm。

若考虑挠度作用下支座水平分力引起弯矩的影响，可按下式计算弯曲强度：

$$\sigma_{\mathrm{f}} = \frac{3Fl}{2bh^2}\left[1 + 4(f/l)^2\right]$$

式中　$f$——试样跨距中点处的挠度，单位为 mm；

$\sigma_{\mathrm{f}}$——弯曲强度（或挠度为 1.5 倍试样厚度时的弯曲应力），单位为 MPa；

$F$——破坏载荷（或最大载荷，或挠度为 1.5 倍试样厚度时的载荷），单位为 N；

$l$——跨距，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm。

2）弯曲弹性模量按下式计算：

$$E_{\mathrm{f}} = \frac{l^3 \Delta F}{4bh^3 \Delta f}$$

式中　$E_{\mathrm{f}}$——弯曲弹性模量，单位为 MPa；

$\Delta F$——载荷-挠度曲线上初始直线段的载荷增量，单位为 N；

$\Delta f$——与载荷增量 $\Delta F$ 对应的跨距中点处的挠度增量，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm。

3）试样外表面层的应变按下式计算：

$$\varepsilon = \frac{6fh}{l^2}$$

式中　$\varepsilon$——应变（%）；

$f$——试样跨距中点处的挠度，单位为 mm；

$l$——跨距，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

## 8.10　塑料焊接试样弯曲试验

塑料焊接试样弯曲试验按照 HG/T 4283—2011《塑料焊接试样　弯曲检测方法》进行。

### 8.10.1　试样

**1. 取样要求**

1）焊件应做出下列识别标记：①材料牌号；②焊工标识号。

2）试样应从焊接完成后至少放置 8h 的焊件上按规定截取，截取时焊接接头垂直于焊缝轴线方向，按 GB/T 11997 的要求进行加工。试样加工完成后，焊缝的轴线应位于试样平行长度部分的中间。

**2. 试样形状和尺寸**

1）试样形状分平行面和辐射面两种。平行面（板材、管材）试样形状如图 8-49 所示，辐射面（管材）试样形状如图 8-50 所示。

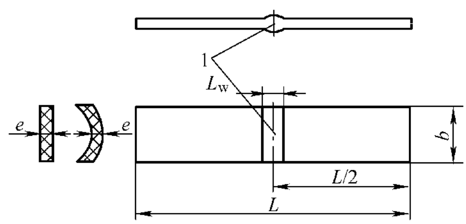



图 8-49　平行面（板材、管材）试样形状

1—焊缝　$L$—试样总长度（mm）　$b$—试样宽度（mm）

$e$—试样厚度（mm）　$L_w$—焊缝宽度（mm）

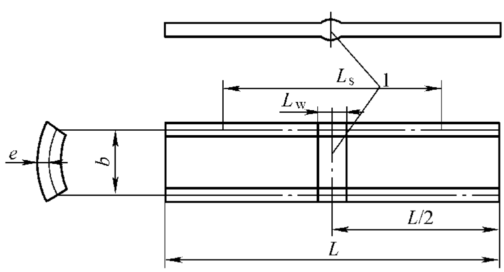



图 8-50　辐射面（管材）试样形状

1—焊缝　$L$—试样总长度（mm）　$b$—试样宽度（mm）

$e$—试样厚度（mm）　$L_w$—焊缝宽度（mm）

$L_s$—两支撑滚轮之间的跨度（mm）

2）厚度小于 30mm 的试样尺寸和试验装置的相关尺寸如表 8-16 所示。

表 8-16　试样尺寸和试验装置的相关尺寸　　（单位：mm）

| 试样尺寸 | | | | 试验机 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 厚度 $e$ | 宽度 $b$ | | 长度 $L$ | 滚轮 | | 压头直径 $a$ |
| | 管材 | 板 | | 间距 $L_s$ | 直径 $D$ | |
| >3 ~5 | 0.1$d_n$①<br>最小:6 ±0.2<br>最大:30 ±0.5 | 20 ±0.4 | 150 ±3 | 80 | 50 | 4 |
| >5 ~10 | | 20 ±0.4 | 200 ±4 | 90 | | 8 |
| >10 ~15 | | 20 ±0.4 | 200 ±4 | 100 | | 12.5 |
| >15 ~20 | | 30 ±0.5 | 250 ±4 | 120 | | 16 |
| >20 ~30 | | 30 ±0.5 | 300 ±5 | 160 | | 25 |

① $d_n$ 为公称外径。

**3. 试样制备方法**

（1）一般要求　试样加工时应满足以下要求：①在制样过程中不得出现试样过热现象，如在机械加工中使用切削液，应不影响试样性能；②试样表面应无损伤，内部无缺陷，厚度均匀；③焊缝应在试样的中部；④硬质材料试样不得扭曲。

（2）取样　根据不同材料、不同厚度的焊件，选择机械加工方法进行取样。

（3）板材焊件试样制备　按要求采用机械加工方法从焊件上制备试样，与压头接触面的焊缝余高部分可采用机械加工方法加工至与母材同厚度。

（4）管材焊件试样制备　从管材上取样条时不得加热或压平，样条的纵向平行于管材的轴线，取样位置如图 8-51 所示。试样应在其周围均匀取样，取样面可以是平行或辐射状，辐射状取样的宽度数值等于最大值和最小值的平均值。平行面取样及受力方向如图 8-52 所示，辐射面取样及受力方向如图 8-53 所示。

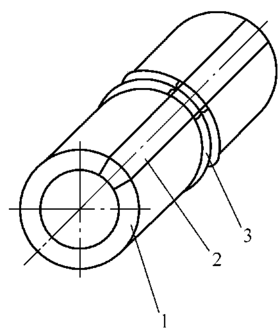



图 8-51　管材焊接弯曲试样取样立体示意图

1—焊件　2—所取的试样　3—焊缝

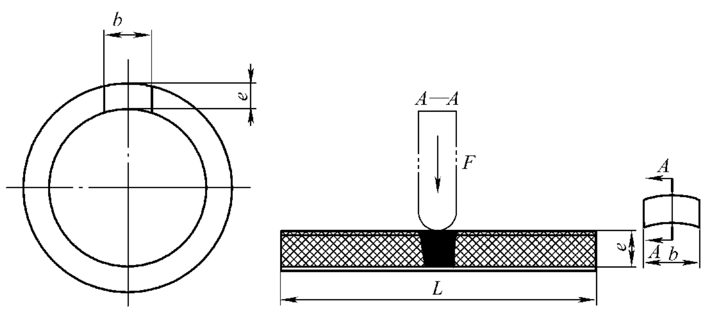



图 8-52　平行面取样和受力方向

$b$—试样宽度（mm）　$e$—试样厚度（mm）　$L$—焊缝宽度（mm）　$F$—加载力（N）

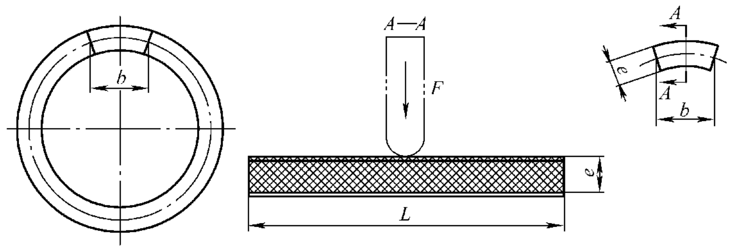



图 8-53　辐射面取样和受力方向

$b$—试样宽度（mm）　$e$—试样厚度（mm）　$L$—焊缝宽度（mm）　$F$—加载力（N）

（5）厚度大于 30mm 试样的尺寸　焊件厚度大于 30mm 时，可以将与试验机压头相接触的那一面进行削减厚度至 30mm。

（6）试样的检查　试样的检查内容如下：

1）试样不得扭曲，加工面应平整，所有的表面和边缘应无刮痕、麻点、凹陷和飞边。

2）采用通用量具检测试样的尺寸，应符合相关规定。

**4. 试样数量**

1）按规定在焊件上至少取 6 个试样。如果需要精密度更高的平均值，试样数量可能多于 6 个，具体的试样数量可用置信区间进行估算。

2）试样在跨度中部 1/3 外断裂的试验结果应予作废，并应重新取样进行试验。

## 8.10.2　试验设备

**1. 试验机**

1）当试验机的压头碰到试样时应自动开始读数，当出现断裂或变形破坏时应自动或人工停止，并作记录。

2）试验机其他要求应符合 GB/T 17200 的规定。

**2. 支座和压头**

1）两个支座和中心压头的位置如图 8-54 所示。在试样宽度方向上，支座和压头之间的平行度误差应在 ±0.2 mm 以内。

2）滚轮和压头的宽度应该大于试样的宽度。为了防止在挤压过程中滑脱，可以采用防滑的压头，或将压头底部用纸包覆起来。

3）支座滚轮直径为 50mm。

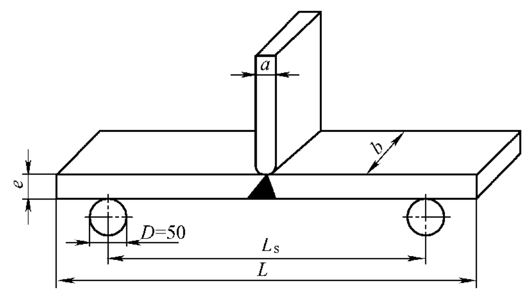



图 8-54　弯曲试验示意图

$L$—试样总长度（mm）　$b$—试样宽度（mm）　$e$—试样厚度（mm）　$L_s$—两支撑滚轮之间的跨度（mm）　$a$—压头直径（mm）　$D$—支撑滚轮直径（mm）

**3. 测量器具**

1）应采用游标卡尺或等效的仪

器测量试样宽度和厚度，其读数精度为0.02mm或更优。

2）角度测量仪器的测量精度应小于1°。由于测试过程中试样与滚轮时刻在变动，所以在测试时应选定一个不变点进行，并标记为中心点，用于测量。

3）挤压位移测量仪器的测量精度应小于0.1mm。

## 8.10.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

（1）安装试样　根据试样的厚度、直径等参数，测算支座的跨度与压头的直径。调整支座，将试样对称地放在支座上，试验压头对准焊缝中心线。焊接试样的各种弯曲类型如图8-55所示。

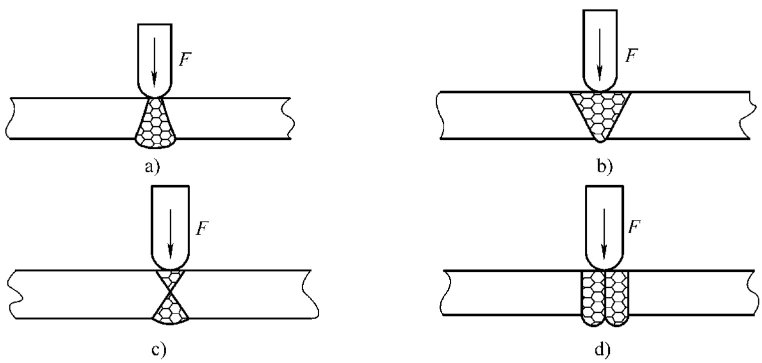



图8-55　焊接试样的各种弯曲类型

a）单面焊面弯试验　b）单面焊背弯试验　c）双面焊弯曲试验　d）对接焊弯曲试验

（2）挤压速度　弯曲试验时的挤压速度如表8-17所示。

**表8-17　弯曲挤压速度**

| 材　　料 | | 挤压速度/(mm/min) |
|---|---|---|
| PVC-U、PVC-C | | 20 |
| PP | PP-R | 50 |
| | PP-H、PP-B | 20 |
| PE | PE-HD、PE-MD | 50 |
| | PE-LD | 20 |
| PVDF | | 10 |
| PTFE-TFM | | 10 |
| ABS | | 20 |
| PA | | 20 |

（3）记录　记录试验过程中的弯曲角和挤压位移。

（4）弯曲方式　抽取6个弯曲试样。单面焊的试样全部面弯；双面焊的试样3个面弯，3个背弯。对于厚度大于30mm的试样，可采用侧弯。

**2. 结果表示**

（1）弯曲角的确定　试样的原始弯曲角如图8-56所示，试样的最终弯曲角如

图 8-57所示。

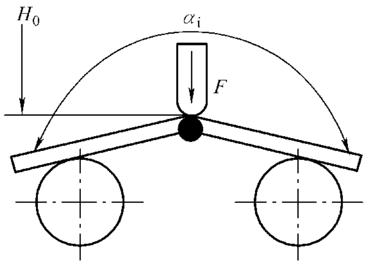



图 8-56　试样原始弯曲角及挤压位移示意图
F—施加力（N）　$H_0$—原始挤压位移值（mm）
$\alpha_i$—原始弯曲角（°）

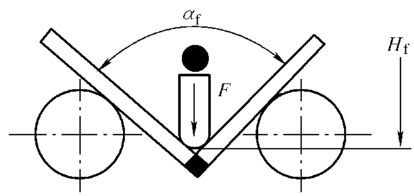



图 8-57　试样最终弯曲角及最终挤压位移示意图
F—施加力（N）　$H_f$—最终挤压位移值（mm）
$\alpha_f$—最终弯曲角（°）

试样弯曲角按下式计算：

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_f$$

式中　$\Delta\alpha$——弯曲角，单位为（°）；
$\alpha_i$——原始弯曲角，单位为（°）；
$\alpha_f$——最终弯曲角，单位为（°）。

（2）挤压位移的确定　试样挤压位移按下式计算：

$$\Delta H = H_f - H_0$$

式中　$\Delta H$——挤压位移，单位为 mm；
$H_f$——最终挤压位移值，单位为 mm；
$H_0$——原始挤压位移值，单位为 mm。

## 8.11　硬质泡沫塑料弯曲强度和表观弯曲弹性模量测定试验

硬质泡沫塑料弯曲强度和表观弯曲弹性模量测定试验按照 GB/T 8812.2—2007《硬质泡沫塑料　弯曲性能的测定　第 2 部分：弯曲强度和表观弯曲弹性模量的测定》进行。

### 8.11.1　试样

（1）形状和尺寸　试样为表 8-18 中规定尺寸的长方体，同时与两支座间跨度 L 值相对应。

**表 8-18　试样尺寸**　（单位：mm）

| 尺　　寸 | 推 荐 尺 寸 | 尺 寸 范 围 |
|---|---|---|
| 长度 | 350 | ≥L+50 |
| 宽度 b | 4d | ≥2d |

（续）

| 尺　　寸 | 推 荐 尺 寸 | 尺 寸 范 围 |
|---|---|---|
| 厚度 $d$ | 25 | 15 ~ 38 |
| 跨度 $L$ | 300 | $12d \sim 16d$ |

注：鉴于跨度的调节范围，厚度值大于 25mm 时，应在 $12d \sim 16d$ 范围的下限选择跨度值；厚度值小于 25mm 时，应在 $12d \sim 16d$ 范围的上限选择跨度值。

（2）制备　制样时不应使试样的泡孔结构变形。试样可以一面或几面带表皮，如带表皮，应记录该情况。

（3）数量　每组样品至少 5 个。当怀疑试验材料具有各向异性时，应制备两组试样，其轴线分别平行和垂直于泡孔伸长的方向。

当试样有一面带皮时，除另有规定外，应试验两组试样：一组试验使表皮处于拉伸状态，另一组试验使表皮处于压缩状态，分别报告试验结果。

（4）状态调节　试样应在 GB/T 2918 规定的一种环境中进行状态调节。标准试验条件为温度 23℃ ±2℃ 和相对湿度为 50% ±5% 或者温度为 27℃ ±2℃ 和相对湿度为 65% ±10%。根据不同的用途，也可以选择别的试验条件，但试验温度最好从 −196℃、−70℃、−10℃ 和 40℃ 中选择。

## 8.11.2　试验设备

**1. 试验机**

采用能使负荷压头等速移动的材料试验机。试验机量程内应使施加的负荷和形变测量精度为 ±1%，应包括能同时记录压力和相应形变的装置。

**2. 支座**

1）由两个装在同一水平板上的平行圆柱组成，圆弧半径为 15mm ±1mm，长度大于试样宽度。

2）支座间跨度应可在 200 ~ 450mm 之间调节，推荐跨度为 300mm。

**3. 负荷压头**

负荷压头的形状和尺寸与支座相同，负荷压头应处于支座中央并与支座平行。

**4. 量具**

量具的精度为 0.01mm。

## 8.11.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

负荷压头以一定速度对支撑在两支座上的试样施加负荷，负荷应垂直于试样施加在两支点中央，如图 8-58 所示，记录该负荷和变形，计算弯曲强度和表观弯曲弹性模量。

**2. 试验步骤**

1）规定测量试样尺寸，将试样对称放置在支座上，以等速移动加荷压头，垂直于试样的纵轴方向施加压力：①测量弯曲弹性模量时，试验速度为 20mm/min ±1mm/min；②测量弯曲强度时，试验速度为 20 mm/min ±1mm/min 或 100mm/min ±10mm/min。

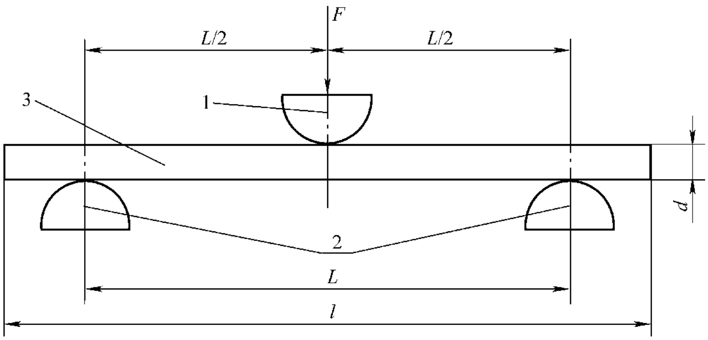



图 8-58　试验原理示意图

1—负荷压头　2—支座　3—试样　$L$—支座间跨度（mm）　$l$—试样长度（mm）　$d$—试样厚度（mm）　$F$—负荷（kN）

2）记录负荷-应变曲线，并画一条直线正切于曲线的最陡部分，如图 8-59 所示。当试样于应变 5% 前发生断裂，记录断裂负荷。应变超过 5% 时不必再继续试验。当应变达到 5% 时，检查试样有无断裂，如发现试样有任何断裂现象，舍去此弯曲强度值。

用推荐试样和加荷装置。当变形达到 30mm 时，应变为 5%。

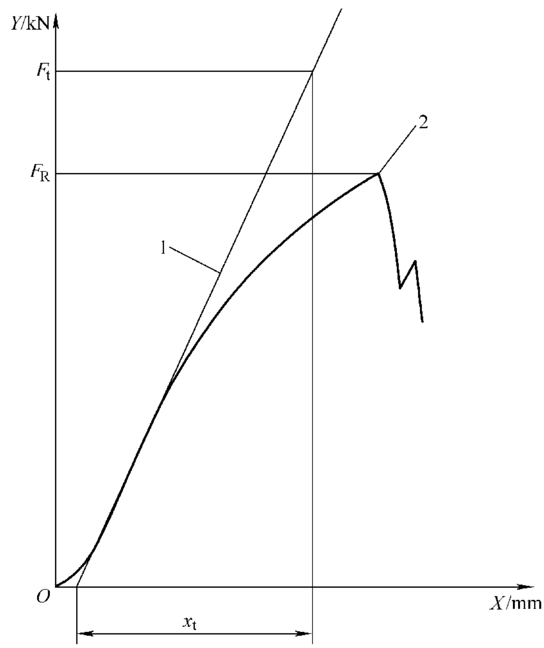



图 8-59　典型负荷-应变图

$X$—变形　$Y$—负荷　1—切线　2—断裂负荷（kN）　$F_R$—施加的最大负荷（kN）　$F_t$—相应于变形 $x_t$ 的负荷（kN）　$x_t$—相应变形（mm）

**3. 结果表示**

1）按下式计算弯曲强度：

$$R = 1.5F_R \times \frac{L}{bd^2} \times 10^6$$

式中 $R$——弯曲强度，单位为 kPa；

$F_R$——施加的最大负荷，单位为 kN；

$L$——两支座间跨度，单位为 mm；

$b$——试样的宽度，单位为 mm；

$d$——试样的厚度，单位为 mm。

2）按下式计算表观弯曲弹性模量：

$$E = \frac{L^3}{4bd^3} \times \frac{F_t}{x_t} \times 10^6$$

式中 $E$——表观弯曲弹性模量，单位为 kPa；

$L$——两支座间跨度，单位为 mm；

$b$——试样的宽度，单位为 mm；

$d$——试样的厚度，单位为 mm；

$F_t$——相应于变形 $x_t$ 的负荷，单位为 kN；

$x_t$ ——相应变形，单位为 mm。

## 8.12 硬质橡胶弯曲试验

硬质橡胶弯曲试验按照 HG/T 3844—2008《硬质橡胶　弯曲强度的测定》进行。

### 8.12.1 试样

**1. 形状和尺寸**

试样为长方体，其长度为 120mm，宽度为 15.0mm ± 0.2mm，厚度为 6.3mm ± 0.3mm。同一试样的宽度变化应不大于 0.1mm，厚度变化应不大于 0.05 mm。

**2. 表面要求**

试样的正面和侧面必须进行机械加工，加工面要求平滑光洁，不应有裂纹或其他缺陷。

**3. 试样的数量**

每组试样不少于 3 个。

### 8.12.2 试验设备

**1. 试验机**

试验机通过试验装置对试样施加作用力，要符合下列要求：

1）使用力值在量程的 15% ~85% 范围内。

2）试验装置的移动速度必须均匀，并使施加的作用力在 30s ± 15s 内达到最大值。

**2. 试验装置**

试验装置如图 8-60 所示，由两个支座和一个压头构成。

1）支座是由两个坚固的截面为三角状的金属支座构成，支座间距离为 100. 0mm ± 0. 2mm。支座端部的半径为 3. 15mm ± 0. 20mm，支座的宽度应大于试样的宽度。

2）压头安装在两支架之间中心点的范围内。压头端半径为 3. 15mm ± 0. 20mm，宽度应与两支座的宽度相同，支座与压头平行并与试样垂直。

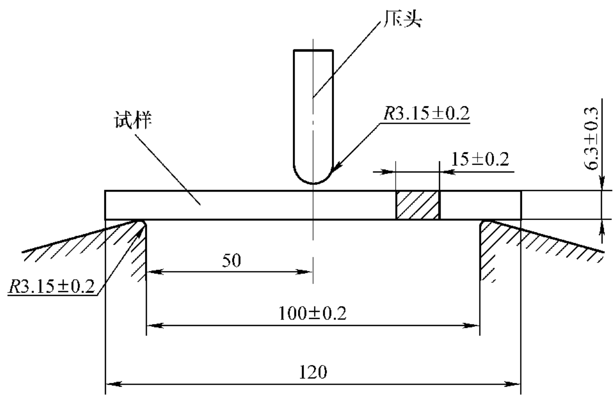



图 8-60　试验装置

## 8. 12. 3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）测量试样中部受力部分的宽度和厚度，分别测量 3 点，取中位数，精确到 0. 02mm。

2）将试验装置安装在试验机上。调整试验机指针的零点，试样前压头刃口应高于两支点平面 15 ~ 20mm。

3）将试样宽面放在两支座上，使两端伸出部分的长度大约相等。

4）开动试验机，通过调节试验机的速度，使试样在 30s ± 15s 发生破坏或达到最大值。

5）当压头与试样接触的瞬间，开始计时。试样结束后，记录试验机所指示的力值。

6）观察试样断面，以确定试样内部是否有气孔、杂质等内部缺陷，如有缺陷该试样数据作废，应重新取样测定。

**2. 结果表示**

硬质橡胶弯曲强度按下式计算：

$$R = \frac{1.5FL}{bd^2}$$

式中　$R$——弯曲强度，单位为 MPa；

$F$——试样所承受的最大力值，单位为 N；

$L$——两支座间的间距，单位为 mm；

$b$——试样的宽度，单位为 mm；

$d$——试样的厚度，单位为 mm。

## 8.13　不透性石墨材料弯曲试验

不透性石墨材料弯曲试验按照 GB/T 13465.2—2002《不透性石墨材料抗弯强度试验方法》进行。

### 8.13.1　试样

**1. 取样**

1）以相同原料、配方及生产工艺生产的同一规格不多于 30t 的石墨块作为一批，随机抽样，抽样数量不少于 3 块。

2）外购材料以同一时间、从同一生产厂家购进的同一规格材料为一批，随机抽样，抽样数量不少于 3 块。

3）最小截面尺寸不大于 200mm×200mm 的材料，在端部截去 50mm，其余部分均可加工试样。

4）最小截面尺寸大于 200mm×200mm 的材料，在各表层刨去 50mm，其余部分均可加工试样。

5）直径不大于 350mm 的材料，在端部截去 50mm，然后在中心直径为 100mm 的圆柱体内取材加工成试样。

6）直径大于 350mm 的材料，在端部截去 50mm，然后在中心直径为 200mm 的圆柱体内取材加工成试样。

**2. 试样加工**

1）每组试样须分别从所抽石墨材料中制取。

2）浇注试样应进行热固化处理，热处理温度按产品要求确定。

3）试样加工时，除有特殊要求外，应使拉伸、压缩试样试验时的受力方向与材料的成型压力方向平行，使弯曲、冲击试样试验时的受力方向与材料的成型压力方向垂直。

4）先对所取石墨材料进行粗加工，然后按生产工艺进行浸渍，加工成试样。

5）加工后试样表面粗糙度须达 $Ra \leq 3.2\mu m$。

6）粘结剂试样成型后不需再加工。

7）试样表面应无气泡、裂纹、砂眼、树脂瘤等明显缺陷。

**3. 试样的尺寸**

1）块材尺寸：$(120 \pm 0.5)mm \times (20 \pm 0.1)mm \times (20 \pm 0.1)mm$，平行度误差不大于 0.1mm/100mm，表面粗糙度 $Ra$ 不大于 $3.2\mu m$。

2）管材尺寸：直径、壁厚及偏差均按产品规格规定，长度等于管外径的 5 倍加 30mm。

3）粘结剂浇铸件尺寸：$(120 \pm 0.5)mm \times (20 \pm 0.2)mm \times (20 \pm 0.2)mm$。

**4. 数量**

每组试样不少于 5 个。

## 8.13.2　试验设备

1）试验装置如图 8-61 所示。

2）上压头宽度应大于试样宽度。

3）石墨管试样试验用上压头，其半径 $R$、宽度 $b$ 与试样半径名义尺寸及偏差相同。上压头示意图如图 8-62 所示。

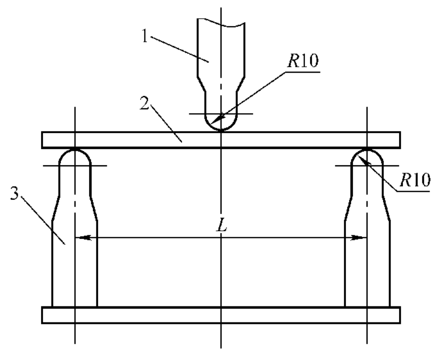



图 8-61　试验装置

1—上压头　2—试样　3—支座

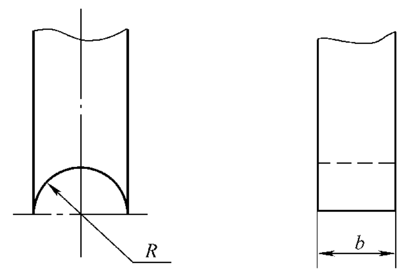



图 8-62　石墨管试验用上压头

$R$—半径（mm）　$b$—宽度（mm）

4）支座跨距：①块材的支座跨距 $L$ 等于 100mm ± 0.5mm；②管材的支座跨距 $L$ 等于试样外径的 5 倍。

## 8.13.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）块材的测量。用游标卡尺沿轴向测量宽度和厚度各 3 次，分别取其算术平均值。

2）管材的测量。用游标卡尺测量内外径：外径沿轴向测 3 处，每处测量互相垂直方向的直径各取所得 6 个数据的算术平均值；内径测量两端管口处，每处测量互相垂直的内径各 1 次，取所得 4 个数据的算术平均值。

3）按要求调整好支座跨距，放好试样，且使上压头、支座轴向皆垂直于试样轴。

4）压头要压在整个试样宽度上，以 0.1MPa/s 或 5mm/min 的加载速度均匀且无冲击地施加负荷，直至试样断裂，读取断裂负荷值。

**2. 结果表示**

1）石墨块抗弯强度按下式计算：

$$\sigma = 3FL/2bh^2$$

式中　$\sigma$——石墨块抗弯强度，单位为 MPa；

$F$——断裂负荷值，单位为 N；

$L$——支座跨距，单位为 mm；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm。

2）石墨管抗弯强度按下式计算：

$$\sigma_f = 8FLD/\pi(D^4 - d^4)$$

式中　$\sigma_f$——石墨管抗弯强度，单位为 MPa；

$F$——断裂负荷值，单位为 N；

$L$——支座跨距，单位为 mm；

$D$——石墨管外径，单位为 mm；

$d$——石墨管内径，单位为 mm。

# 第 9 章　材料断裂性能测定试验

## 9.1　金属材料表面裂纹拉伸试样断裂韧度试验

金属材料表面裂纹拉伸试样断裂韧度试验按照 GB/T 7732—2008《金属材料　表面裂纹拉伸试样断裂韧度试验方法》进行。

### 9.1.1　试样

1）表面裂纹拉伸断裂韧度试样如图 9-1 所示。

2）表面裂纹拉伸试样断裂韧度与裂纹取向和裂纹扩展方向有关，试样应以两个字母标记其取向。第一个字母表示裂纹面的法线方向，第二个字母表示裂纹深度的预期扩展方向。例如 *X—Z* 表示裂纹面的法线方向为纵向，预期的裂纹扩展方向为板厚方向。标记方法如图 9-2 所示。

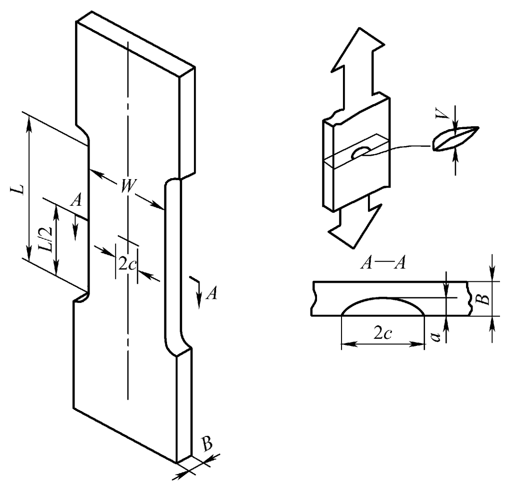



图 9-1　典型表面裂纹试样

*L*—试样测试部分长度（mm）　*W*—试样宽度（mm）　*B*—试样厚度（mm）　*V*—表面裂纹试样中心处的裂纹嘴张开位移（mm）　*a*—裂纹深度（mm）　2*c*—裂纹长度（mm）

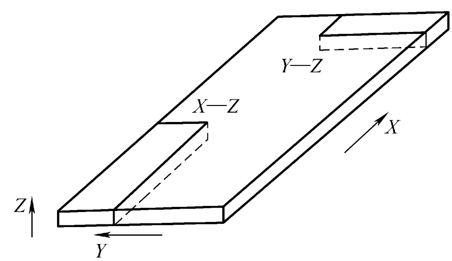



图 9-2　表面裂纹试样的取向标记

*X*—长度方向（纵向）　*Y*—宽度方向（横向）　*Z*—板厚方向

3）对于轧制板材试样，应保留原轧制表面，试样工作部分长度的表面不得有划伤、锈蚀等缺陷。如有特殊要求需要加工试样时，应保留一侧原轧制表面，并在该面预制裂纹，加工面的表面粗糙度 *Ra* 的最大允许值为 3.2μm。

4）为了便于预制疲劳裂纹，一般在试样进行最终热处理之前，用薄片的金刚石圆锯或类似的刀具和电火花机床在试样表面中部制造一个人造裂纹源。

5）试样应尽可能在热处理之前预制疲劳裂纹。预制疲劳裂纹的深度应不小于0.25$B$或1.0mm，取其较小者，并且疲劳裂纹的扩展量应不小于最终裂纹长度的5%。在疲劳预制裂纹前缘各点的法平面上，裂纹及其加工裂纹源应位于裂纹前缘为顶点的30°楔形区域内，如图9-3所示。最小与最大循环应力之比不大于0.1。

## 9.1.2　试验设备

1）采用的试验机应配有力-位移自动记录装置，并能够自动绘制曲线。

2）引伸计应能准确测量表面裂纹中心处的裂纹前端张开位移。典型的测量装置如图9-4所示。

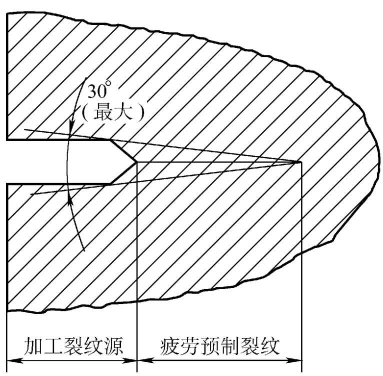



图9-3　加工裂纹源及疲劳预制裂纹的包迹形状

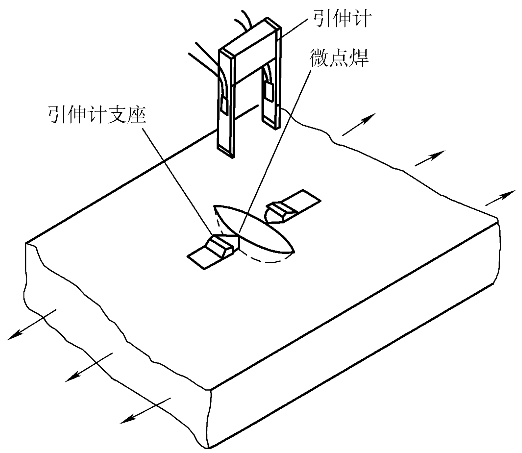



图9-4　裂纹尖端张开位移典型的测量装置

## 9.1.3　试验内容及结果表示

**1. 断裂试验**

1）采用拉伸连续加力方式进行断裂试验，应保证名义应力[$F/(BW)$]速率小于690MPa/min。$F$是试验力，单位为N；$B$是试样厚度，单位为mm；$W$是试样宽度，单位为mm。

2）试样装夹引伸计后，应在约$0.3R_{p0.2}BW$力以下反复加力1～2次，自动记录力-位移（$F$-$V$）曲线，调整记录装置的放大倍数，使曲线线性部分的斜率在1～3之间。

3）对试样连续加力至断裂，同时记录$F$-$V$曲线和试验中达到的最大力$F_{max}$。

4）测量裂纹深度$a$和长度$2c$，精确到0.01mm。

**2. 条件力$F_Q$的确定**

1）试验可能出现如图9-5所示的三种典型的$F$-$V$曲线。

2）在 $F$-$V$ 曲线上，通过原点 $O$ 做割线 $OD$，割线 $OD$ 的斜率比初始切线 $OA$ 的斜率降低 15%，并与 $F$-$V$ 曲线相交于 $F$ 点，与 $F$ 点相对应的力为 $F_{15}$。当 $F_{15}$以前曲线所对应的 $F_{max}$（或 $F_1$）大于或等于 $F_{15}$时（图 9-5 中曲线Ⅰ和Ⅱ），则 $F_Q = F_{max}$（或 $F_1$）。当 $F_{15}$以前的曲线上任意一点所对应的力均低于 $F_{15}$时（图 9-5 中曲线Ⅲ），则 $F_Q = F_{15}$。一般来说，$F_{15}$对应于裂纹的条件启裂。

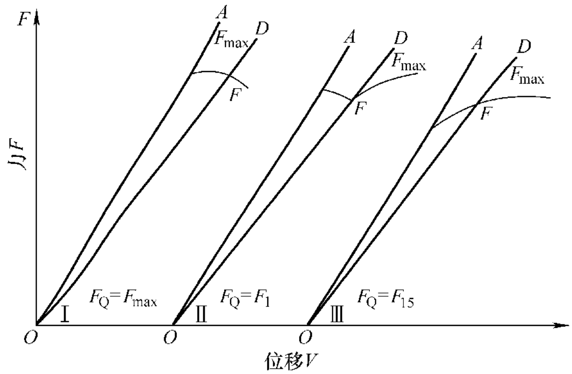



图 9-5　三种典型的 $F$-$V$ 曲线

### 3. 条件断裂韧度 $K_{IQ}$的计算

条件断裂韧度 $K_{IQ}$按下式计算：

$$K_{IQ} = (M/\Phi)\sigma\sqrt{\pi a}$$

式中　$K_{IQ}$——表面裂纹拉伸试样的条件断裂韧度，单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$；

$a$——裂纹深度，单位为 mm；

$M/\Phi$——系数比值，如表 9-1 所示；

$\sigma$——$\sigma = F_Q/(BW)$，式中 $F_Q$ 是条件力，单位为 N，$B$ 是试样厚度，单位为 mm；$W$ 是试样宽度，单位为 mm。

**表 9-1　$M/Q$ 值**

| a/C ＼ a/B | 0.400 | 0.410 | 0.420 | 0.430 | 0.440 | 0.450 | 0.460 | 0.470 | 0.480 | 0.490 | 0.500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.400 | 1.0724 | 1.0780 | 1.0836 | 1.0894 | 1.0952 | 1.1012 | 1.1071 | 1.1132 | 1.1193 | 1.1255 | 1.1317 |
| 0.410 | 1.0650 | 1.0684 | 1.0739 | 1.0795 | 1.0852 | 1.0909 | 1.0967 | 1.1025 | 1.1084 | 1.1144 | 1.1204 |
| 0.420 | 1.0538 | 1.0591 | 1.0644 | 1.0648 | 1.0753 | 1.0806 | 1.0864 | 1.0921 | 1.0978 | 1.1036 | 1.1094 |
| 0.430 | 1.0447 | 1.0498 | 1.0550 | 1.0602 | 1.0655 | 1.0709 | 1.0763 | 1.0818 | 1.0873 | 1.0929 | 1.0985 |
| 0.440 | 1.0358 | 1.0407 | 1.0457 | 1.0508 | 1.0559 | 1.0611 | 1.0564 | 1.0717 | 1.0770 | 1.0825 | 1.0879 |
| 0.450 | 1.0270 | 1.0318 | 1.0366 | 1.0415 | 1.0465 | 1.0515 | 1.0566 | 1.0618 | 1.0669 | 1.0772 | 1.0775 |
| 0.460 | 1.0183 | 1.0229 | 1.0276 | 1.0324 | 1.0372 | 1.0421 | 1.0470 | 1.0520 | 1.0570 | 1.0621 | 1.0672 |
| 0.470 | 1.0098 | 1.0142 | 1.0188 | 1.0234 | 1.0281 | 1.0328 | 1.0376 | 1.0424 | 1.0473 | 1.0522 | 1.0571 |
| 0.480 | 1.0013 | 1.0057 | 1.0101 | 1.0145 | 1.0191 | 1.0236 | 1.0283 | 1.0329 | 1.0377 | 1.0424 | 1.0472 |
| 0.490 | 0.9930 | 0.9972 | 1.0015 | 1.0058 | 1.0102 | 1.0146 | 1.0191 | 1.0236 | 1.0282 | 1.0328 | 1.0375 |
| 0.500 | 0.9848 | 0.9889 | 0.9930 | 0.9972 | 1.0015 | 1.0058 | 1.0101 | 1.0145 | 1.0189 | 1.0234 | 1.0279 |
| 0.510 | 0.9767 | 0.9807 | 0.9847 | 0.9887 | 0.9929 | 0.9970 | 1.0012 | 1.0055 | 1.0098 | 1.0141 | 1.0185 |
| 0.520 | 0.9687 | 0.9725 | 0.9764 | 0.9804 | 0.9844 | 0.9884 | 0.9925 | 0.9966 | 1.0008 | 1.0050 | 1.0092 |
| 0.530 | 0.9608 | 0.9645 | 0.9683 | 0.9721 | 0.9760 | 0.9799 | 0.9839 | 0.9879 | 0.9919 | 0.9960 | 1.0001 |
| 0.540 | 0.9530 | 0.9567 | 0.9603 | 0.9640 | 0.9678 | 0.9716 | 0.9754 | 0.9793 | 0.9832 | 0.9871 | 0.9911 |
| 0.550 | 0.9454 | 0.9489 | 0.9524 | 0.9560 | 0.9597 | 0.9633 | 0.9671 | 0.9708 | 0.9746 | 0.9784 | 0.9823 |
| 0.560 | 0.9378 | 0.9412 | 0.9446 | 0.9481 | 0.9517 | 0.9552 | 0.9588 | 0.9625 | 0.9662 | 0.9699 | 0.9736 |

（续）

| a/C ╲ a/B | 0.400 | 0.410 | 0.420 | 0.430 | 0.440 | 0.450 | 0.460 | 0.470 | 0.480 | 0.490 | 0.500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.570 | 0.9303 | 0.9336 | 0.9370 | 0.9403 | 0.9438 | 0.9472 | 0.9507 | 0.9543 | 0.9578 | 0.9614 | 0.9650 |
| 0.580 | 0.9229 | 0.9261 | 0.9294 | 0.9387 | 0.9360 | 0.9393 | 0.9427 | 0.9462 | 0.9496 | 0.9531 | 0.9566 |
| 0.590 | 0.9157 | 0.9188 | 0.9219 | 0.9251 | 0.9283 | 0.9316 | 0.9349 | 0.9382 | 0.9415 | 0.9449 | 0.9483 |
| 0.600 | 0.9085 | 0.9115 | 0.9145 | 0.9176 | 0.9207 | 0.9239 | 0.9271 | 0.9303 | 0.9336 | 0.9368 | 0.9401 |

| a/C ╲ a/B | 0.5000 | 0.5100 | 0.5200 | 0.5300 | 0.5400 | 0.5500 | 0.5600 | 0.5700 | 0.5800 | 0.5900 | 0.6000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.400 | 1.1317 | 1.1379 | 1.1442 | 1.1506 | 1.1569 | 1.1633 | 1.1697 | 1.1762 | 1.1826 | 1.1891 | 1.1955 |
| 0.410 | 1.1204 | 1.1265 | 1.1329 | 1.1387 | 1.1448 | 1.1510 | 1.1572 | 1.1634 | 1.1697 | 1.1759 | 1.1821 |
| 0.420 | 1.1094 | 1.1152 | 1.1211 | 1.1271 | 1.1330 | 1.1390 | 1.1450 | 1.1510 | 1.1570 | 1.1630 | 1.1691 |
| 0.430 | 1.0985 | 1.1042 | 1.1099 | 1.1156 | 1.1214 | 1.1272 | 1.1330 | 1.1388 | 1.1446 | 1.1505 | 1.1563 |
| 0.440 | 1.0879 | 1.0934 | 1.0989 | 1.1045 | 1.1100 | 1.1156 | 1.1212 | 1.1269 | 1.1325 | 1.1381 | 1.1438 |
| 0.450 | 1.0775 | 1.0828 | 1.0881 | 1.0935 | 1.0989 | 1.1043 | 1.1097 | 1.1152 | 1.1206 | 1.1261 | 1.1315 |
| 0.460 | 1.0672 | 1.0723 | 1.0775 | 1.0827 | 1.0879 | 1.0932 | 1.0984 | 1.1037 | 1.1090 | 1.1142 | 1.1195 |
| 0.470 | 1.0571 | 1.0621 | 1.0671 | 1.0721 | 1.0772 | 1.0823 | 1.0874 | 1.0925 | 1.0976 | 1.1027 | 1.1077 |
| 0.480 | 1.0472 | 1.0520 | 1.0569 | 1.0618 | 1.0667 | 1.0716 | 1.0765 | 1.0814 | 1.0864 | 1.0913 | 1.0962 |
| 0.490 | 1.0375 | 1.0421 | 1.0468 | 1.0516 | 1.0563 | 1.0611 | 1.0658 | 1.0706 | 1.0754 | 1.0802 | 1.0849 |
| 0.500 | 1.0279 | 1.0324 | 1.0370 | 1.0415 | 1.0461 | 1.0507 | 1.0554 | 1.0600 | 1.0646 | 1.0692 | 1.0739 |
| 0.510 | 1.0185 | 1.0229 | 1.0273 | 1.0317 | 1.0362 | 1.0406 | 1.0451 | 1.0496 | 1.0540 | 1.0585 | 1.0630 |
| 0.520 | 1.0092 | 1.0135 | 1.0177 | 1.0220 | 1.0263 | 1.0307 | 1.0350 | 1.0393 | 1.0437 | 1.0480 | 1.0523 |
| 0.530 | 1.0001 | 1.0042 | 1.0084 | 1.0125 | 1.0167 | 1.0209 | 1.0257 | 1.0293 | 1.0335 | 1.0377 | 1.0419 |
| 0.540 | 0.9911 | 0.9951 | 0.9991 | 1.0032 | 1.0072 | 1.0113 | 1.0153 | 1.0194 | 1.0235 | 1.0275 | 1.0316 |
| 0.550 | 0.9823 | 0.9862 | 0.9901 | 0.9940 | 0.9976 | 1.0018 | 1.0058 | 1.0097 | 1.0136 | 1.0176 | 1.0215 |
| 0.560 | 0.9736 | 0.9773 | 0.9811 | 0.9849 | 0.9887 | 0.9925 | 0.9963 | 1.0002 | 1.0040 | 1.0078 | 1.0116 |
| 0.570 | 0.9650 | 0.9687 | 0.9723 | 0.9760 | 0.9797 | 0.9834 | 0.9871 | 0.9908 | 0.9945 | 0.9982 | 1.0019 |
| 0.580 | 0.9566 | 0.9601 | 0.9637 | 0.9672 | 0.9708 | 0.9744 | 0.9780 | 0.9816 | 0.9852 | 0.9887 | 0.9923 |
| 0.590 | 0.9483 | 0.9517 | 0.9552 | 0.9586 | 0.9621 | 0.9656 | 0.9690 | 0.9725 | 0.9760 | 0.9795 | 0.9829 |
| 0.600 | 0.9401 | 0.9435 | 0.9468 | 0.9501 | 0.9535 | 0.9569 | 0.9602 | 0.9636 | 0.9670 | 0.9703 | 0.9737 |

**4. $K_{IC}$的确定**

1）当下面三个式子同时成立时，$K_{IC}(B)=K_{IQ}$，$K_{IC}(B)$ 是指厚度为 $B$ 的表面裂纹拉伸试样的断裂韧度，单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$。

$$F_{max}/F_Q \leqslant 1.2$$

$$a \geqslant 0.50(K_{IQ}/R_{p0.2})^2$$

$$(B-a) \geqslant 0.50(K_{IQ}/R_{p0.2})^2$$

2）用不同厚度的板材测定 $K_{IC}(B)$，然后做 $K_{IC}(B)$-$B$ 曲线，当所得的 $K_{IC}(B)$ 不随板材厚度变化时，即为材料的 $K_{IC}$值。

**5. 剩余强度 $\sigma_r$ 的确定**

剩余强度 $\sigma_r$ 按下式计算：

$$\sigma_r = F_{max}/(BW)$$

式中　$\sigma_r$——剩余强度，单位为 MPa；

$F_{max}$——最大拉伸力，单位为 N；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$W$——试样宽度，单位为 mm。

## 9.2　金属材料平面应变断裂韧度试验

金属材料平面应变断裂韧度试验按照 GB/T 4161—2007《金属材料　平面应变断裂韧度 $K_{IC}$试验方法》进行。

### 9.2.1　试样

**1. 试样尺寸**

试样的厚度 $B$、裂纹长度 $a$、韧带尺寸 $W-a$ 应同时满足 $B \geqslant 2.5(K_{IC}/R_{p0.2})^2$、$a \geqslant 2.5(K_{IC}/R_{p0.2})^2$ 和 $W-a \geqslant 2.5(K_{IC}/R_{p0.2})^2$ 的要求，其中 $K_{IC}$是平面应变断裂韧度，单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$，$R_{p0.2}$是规定塑性延伸强度，单位为 MPa。

**2. 试样的形状**

1）裂纹起始缺口与最大允许缺口（裂纹）包迹如图 9-6 所示。

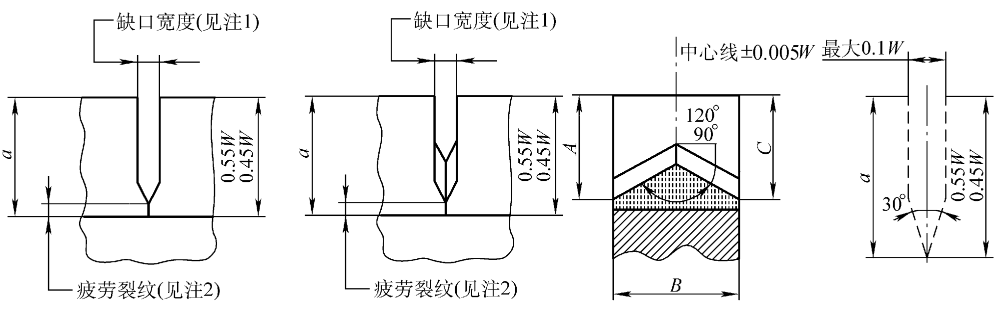



图 9-6　裂纹起始缺口与最大允许缺口（裂纹）包迹

a）直通形缺口　b）山形缺口　c）包迹

$a$—裂纹长度（mm）　$W$—试样宽度（mm）　$B$—试样厚度（mm）　$A=C$

注：1. 裂纹起始缺口应垂直于试样表面，偏差在 ±2°以内，缺口宽度应在 0.1$W$ 以内，但不应小于 1.6mm。

2. 对于直通形缺口试样，建议缺口根部半径最大为 0.1mm，切口尖端角度最大为 90°。每个表面上的最大疲劳裂纹扩展量至少应为 0.025$W$ 或 1.3mm，取其较大者。

3. 对于山形缺口试样，建议缺口根部半径最大为 0.025mm，切口尖端角度最大为 90°，$A=C$，偏差应在 0.01$W$ 以内，疲劳裂纹应在试样的两个表面上都出现。

2）三点弯曲试样如图 9-7 所示。

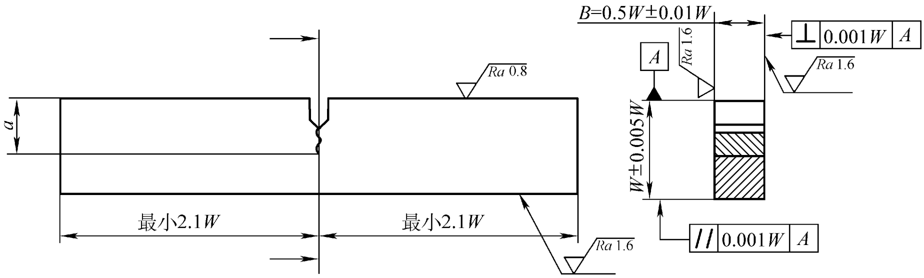



图 9-7　三点弯曲试样

*a*—裂纹长度（mm）　*W*—试样宽度（mm）　*B*—试样厚度（mm）

3）紧凑拉伸试样如图 9-8 所示。

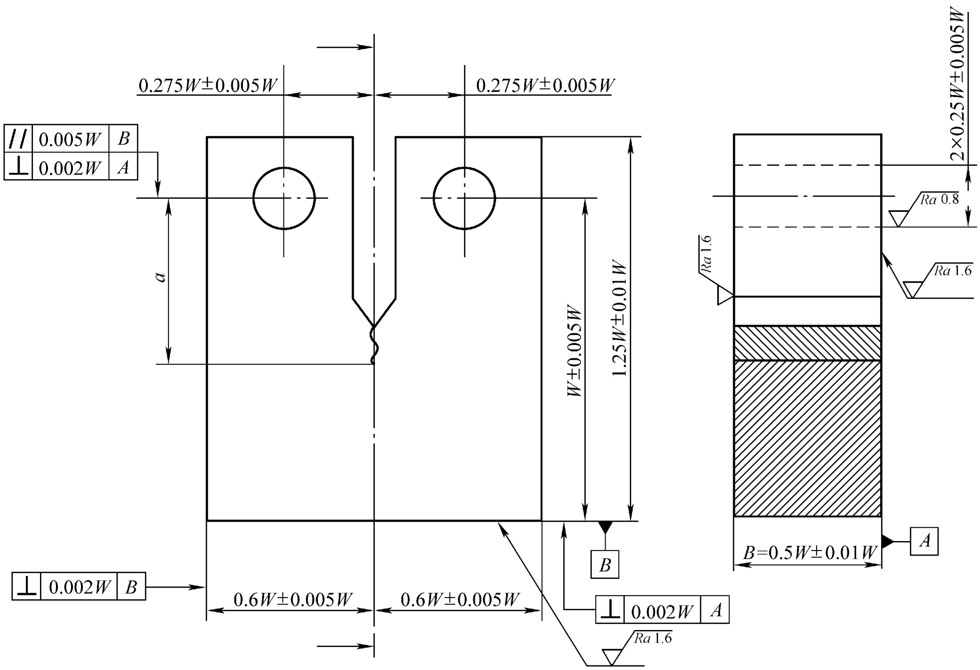



图 9-8　紧凑拉伸试样

*a*—裂纹长度（mm）　*W*—试样宽度（mm）　*B*—试样厚度（mm）

4）台阶形缺口紧拉试样如图 9-9 所示。

5）C 形拉伸试样如图 9-10 所示。

6）圆形紧凑拉伸试样如图 9-11 所示。

## 9.2.2　试验设备

### 1. 试验机

试验机应按 GB/T 16825.1 进行校验，并应不低于 1 级。试验机应备有自动记录施加于试样上力的装置。为了以后分析，也可以选用计算机数据存储系统记录力和位移

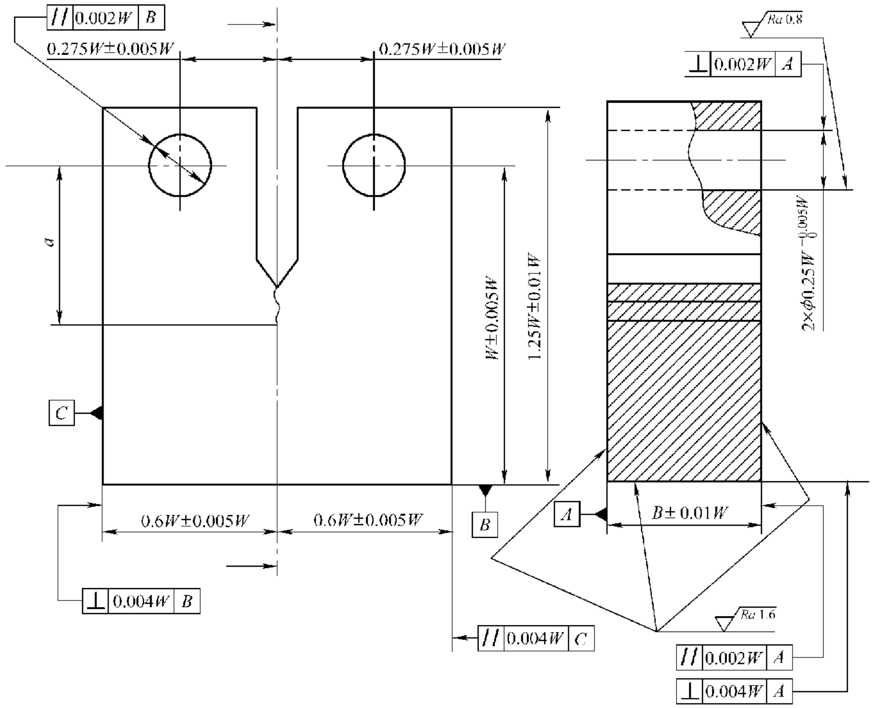



图 9-9　台阶形缺口紧拉试样

*a*—裂纹长度（mm）　*W*—试样宽度（mm）　*B*—试样厚度（mm）

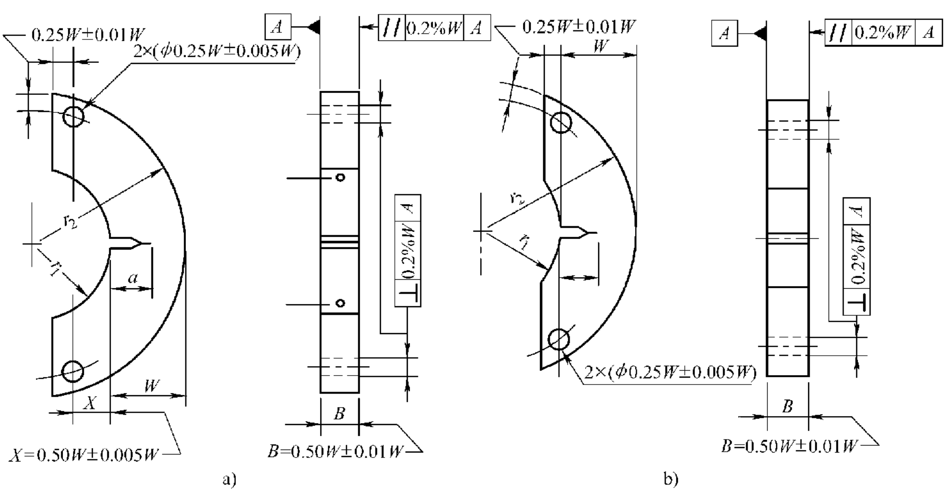



图 9-10　C 形拉伸试样

a）$X/W=0.5$　b）$X/W=0$

量。允许力传感器与记录系统组合，以便能从试验图上以 ±1% 的精度测定力 $F_Q$。

**2. 引伸计**

引伸计的输出应显示缺口嘴两侧精确定位的相对位移，引伸计和刀口的设计应使引

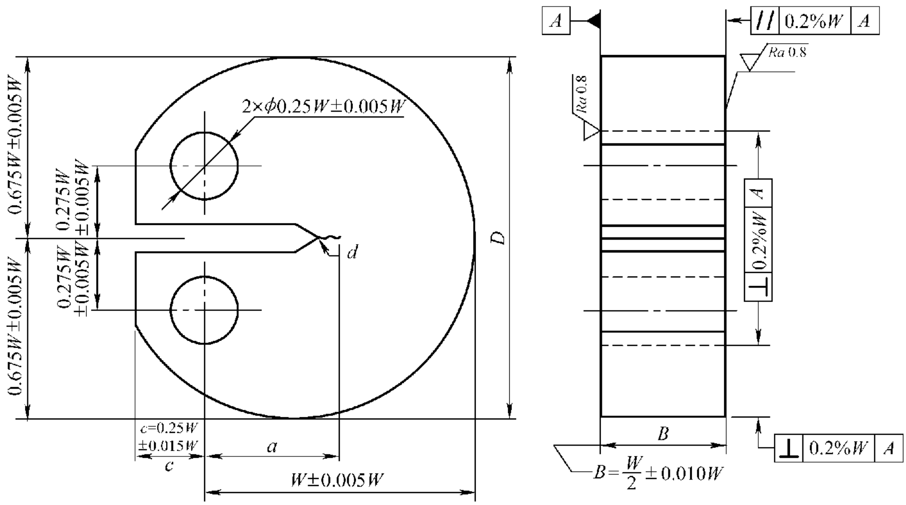



图 9-11　圆形紧凑拉伸试样

伸计与刀口之间的接触点可以自由转动。

**3. 试验夹具**

用于紧凑拉伸试样的 U 形钩如图 9-12 所示，适用于弯曲试样的支座如图 9-13 所示。

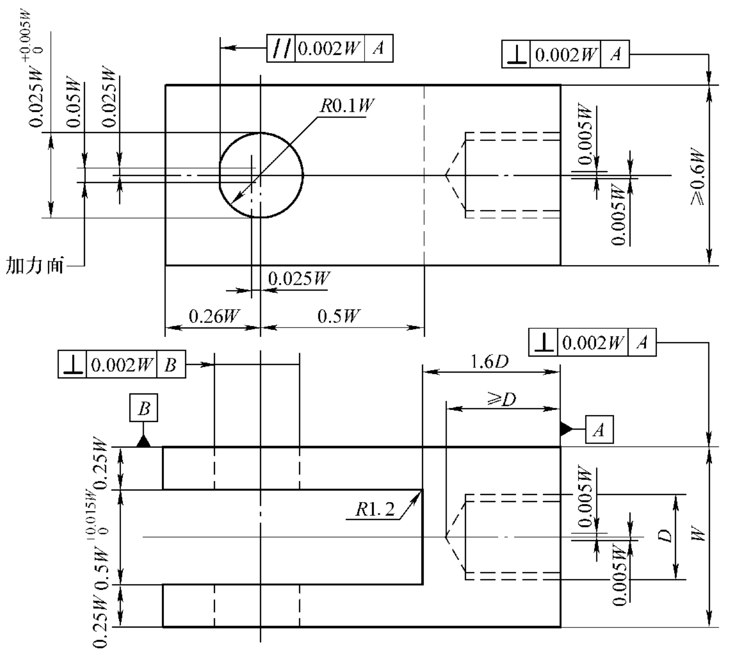



图 9-12　紧凑拉伸试样的 U 形钩

注：1. 销直径为 $0.24W_{-0.005W}^{\ 0}$。

2. 为了便于安装夹式引伸计，必要时可将 U 形钩的角切掉。

3. U 形钩和销的硬度值应≥40HRC。

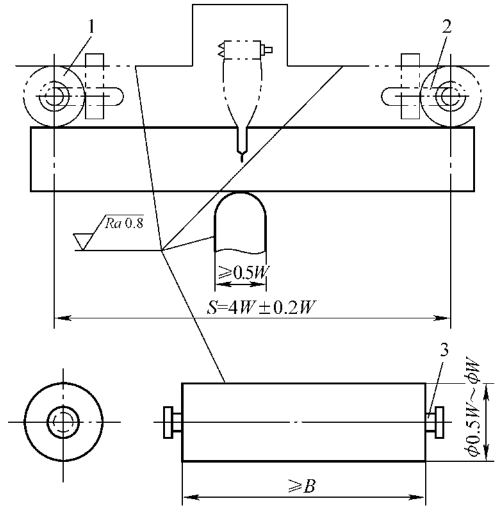



图 9-13　弯曲试样的支座

1—辊　2—橡皮筋或弹簧　3—固定橡皮筋或弹簧的箍

W—试样宽度（mm）　B—试样厚度（mm）

## 9.2.3　试验内容及结果表示

**1. 试验原理**

使用预制疲劳裂纹试样通过增加力来测定金属材料的断裂韧度（$K_{IC}$），力与缺口张开位移可以自动记录，也可以将数据储存到计算机。根据对试验记录的线性部分规定的偏离来确定 2% 最大宏观裂纹扩展量所对应的力，根据这个力计算出 $K_{IC}$。

$K_{IC}$表征了在严格拉伸力约束下有尖端裂纹存在时材料的断裂抗力，此时裂纹尖端附近的应力状态接近于平面应变状态，裂纹尖端塑性区的尺寸比裂纹尺寸、试样厚度和裂纹前沿的韧带尺寸要足够小。$K_{IC}$通常情况下代表了试验温度下断裂韧度的下限值。

**2. 断裂韧度 $K_{IC}$试样疲劳裂纹的预制**

预制疲劳裂纹时可以采用力控制，也可以采用位移控制。最小循环应力与最大循环应力之比（$R$）应不超过 0.1，如果 $K_Q$ 值和有效的 $K_{IC}$结果相等，那么预制疲劳裂纹时的最大应力强度因子应不超过后面试验确定的 $K_Q$ 值的 80%。在预制疲劳预裂纹的最后阶段（裂纹长度 $a$ 的 2.5%），$K_f$ 应不超过 $K_Q$ 值的 60%。若疲劳预裂纹和断裂试验在不同的温度下进行，$K_f$ 应不超过$0.6[(R_{p0.2})_p/(R_{p0.2})_t]K_Q$，其中（$R_{p0.2}$）$_P$ 和（$R_{p0.2}$）$_t$ 分别为预制疲劳裂纹温度下和试验温度下的规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$。

**3. 三点弯曲试样试验**

1）试样缺口的中心对准两个支撑辊中心距的中点，准确到跨距的 1%，同时应与支撑辊垂直，偏差在 ±2°以内。

2）弯曲试样 $K_Q$（$K_{IC}$的条件值）值按下式计算：

$$K_Q = [F_Q S/(BW^{3/2})] \times f(a/W)$$

式中 $K_Q$——$K_{IC}$的条件值，单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$；

$F_Q$——特定的力值，单位为 N；

$S$——弯曲试样跨距，单位为 mm；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$a$——裂纹长度，单位为 mm；

$f(a/W)$——自变量为 $a/W$ 的函数，其值可用下式计算：

$$f(a/W) = 3(a/W)^{1/2} \times \frac{1.99-(a/W)(1-a/W)[2.15-3.93(a/W)+2.70(a/W)^2]}{2(1+2a/W)(1-a/W)^{3/2}}$$

**4. 紧凑拉伸试样试验**

1）为了使加力时偏心最小，加力杆中心线偏差应在 ±0.75mm 以内。

2）紧凑拉伸试样的 $K_Q$ 值按下式计算：

$$K_Q = [F_Q/(BW^{1/2})] \times f(a/W)$$

式中 $K_Q$——$K_{IC}$的条件值，单位为 $N/mm^{3/2}$；

$F_Q$——特定的力值，单位为 N；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$a$——裂纹长度，单位为 mm；

$f(a/W)$——自变量为 $a/W$ 的函数，其值可用下式计算：

$$f(a/W) = (2+a/W) \times \frac{0.866+4.64(a/W)-13.32(a/W)^2+14.72(a/W)^3-5.6(a/W)^4}{(1-a/W)^{3/2}}$$

**5. C 形拉伸试样试验**

1）安装 U 形钩，上、下加力杆中心线偏差在 0.76mm 以内。试样应位于 U 形钩的正中，偏差在 0.76mm 以内。

2）C 形拉伸试样的 $K_Q$ 值按下式计算：

$$K_Q = [F_Q/(BW^{1/2})](3X/W+1.9+1.1a/W) \times [1+0.25(1-a/W)^2(1-r_1/r_2)]f(a/W)$$

式中 $K_Q$——$K_{IC}$的条件值，单位为 $N/mm^{3/2}$；

$F_Q$——特定的力值，单位为 kN；

$B$——试样厚度，单位为 cm；

$W$——试样宽度，单位为 cm；

$a$——裂纹长度，单位为 cm；

$X$——加力孔偏置尺寸，单位为 cm；

$r_1/r_2$——内外半径比；

$f(a/W)$——自变量为 $a/W$ 的函数，其值可用下式计算：

$$f(a/W) = [(a/W)^{1/2}/(1-a/W)^{3/2}] \times [3.74-6.30a/W+6.32(a/W)^2-2.43(a/W)^3]$$

**6. 圆形紧凑拉伸试样试验**

1）安装 U 形钩，上、下加力杆中心线偏差在 0.76mm 以内，试样应位于 U 形钩的

正中，偏差在 0.76mm 以内。

2）圆形紧凑拉伸试样的 $K_Q$ 值按下式计算：

$$K_Q = [F_Q/(BW^{1/2})] \times f(a/W)$$

式中　$K_Q$——$K_{IC}$的条件值，单位为 $N/mm^{3/2}$；

$F_Q$——特定的力值，单位为 kN；

$B$——试样厚度，单位为 cm；

$W$——试样宽度，单位为 cm；

$a$——裂纹长度，单位为 cm；

$f(a/W)$——自变量为 $a/W$ 的函数，其值可用下式计算：

$$f(a/W) = \frac{(2 + a/W)[0.76 + 4.8(a/W) - 11.58(a/W)^2 + 11.43(a/W)^3 - 4.08(a/W)^4]}{(1 - a/W)^{3/2}}$$

**7. 试验结果的计算与解释**

（1）$F_Q$ 的确定　如果采用记录仪，确定条件值 $F_Q$ 的方法如下：

1）在试验记录上，通过原点画一条斜率为$(F/V)_S = 0.95(F/V)_0$的割线 $OF_S$（见图 9-14），其中 $(F/V)_0$ 是记录的线性部分切线 $OA$ 的斜率。

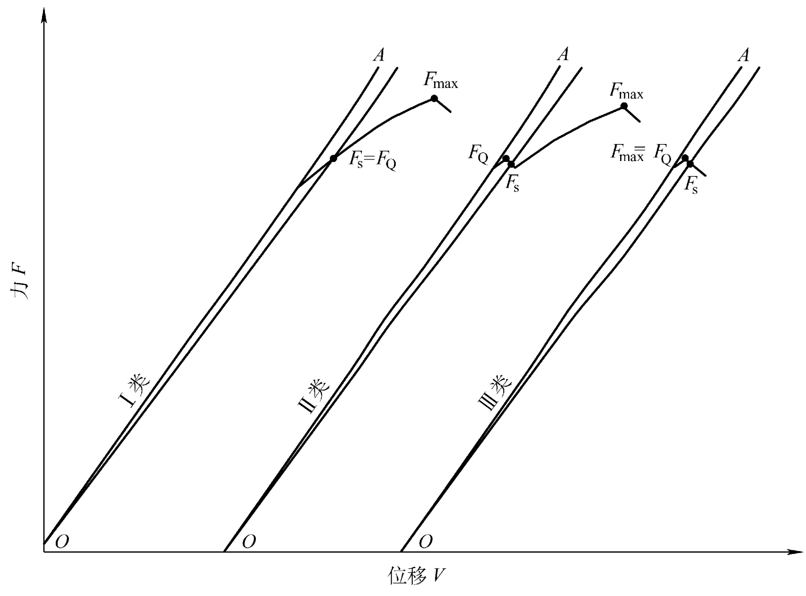



图 9-14　典型的力-位移记录曲线

2）如果在 $F_S$ 之前记录曲线上每一个点的力均低于 $F_S$（Ⅰ类），则取 $F_Q = F_S$。

3）如果在 $F_S$ 之前还有一个最大力超过 $F_S$（Ⅱ类和Ⅲ类），则取这个力为 $F_Q$。

4）如果采用计算机数据采集系统，和上面一样，通过数据缩减程序可确定相同的力（$F_Q$ 和 $F_{max}$）。

（2）$K_{IC}$的确定　计算比值 $F_{max}/F_Q$，其中 $F_{max}$为最大力。

1）若该比值不超过1.10，则可按（1）中所述公式计算 $K_Q$；若比值大于1.10，则该试验不是有效的 $K_{IC}$ 试验。

2）计算 $2.5(K_Q/R_{p0.2})^2$，若这个值小于试样厚度、裂纹长度和韧带尺寸，则 $K_Q$ 等于 $K_{IC}$；否则，该试验不是有效的 $K_{IC}$ 试验。

**8. 断口形貌观察**

典型断口形貌有部分斜断口、大部分斜断口和全部斜断口，如图 9-15 所示。

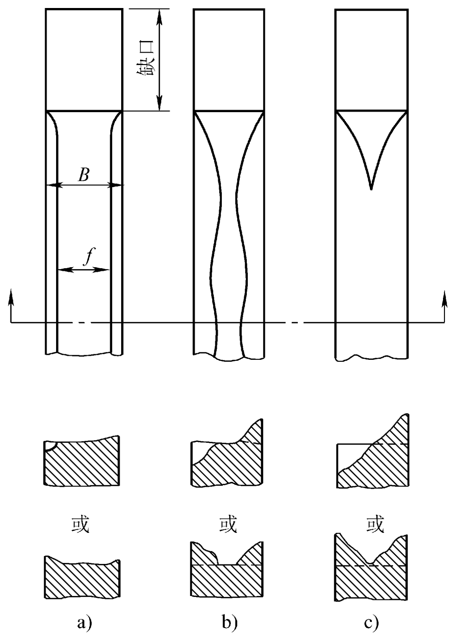



图 9-15　典型的断口形貌

a）部分斜断口　b）大部分斜断口　c）全部斜断口

## 9.3　铁素体钢平面应变止裂韧度试验

铁素体钢平面应变止裂韧度试验按照 GB/T 19744—2005《铁素体钢平面应变止裂韧度 $K_{Ia}$ 试验方法》进行。

### 9.3.1　试样

**1. 试样形状**

平面应变裂纹止裂断裂韧度试样形状如图 9-16 所示。

**2. 试样尺寸**

1）厚度 $B$ 应为板材全厚度或满足平面应变条件的足够厚度。

2）试样侧槽深度为 $B/8$。缺口顶端为脆性合金，焊接后在试样的上下两面开侧槽。

3）试样的宽度范围为 $2B \leqslant W \leqslant 8B$。

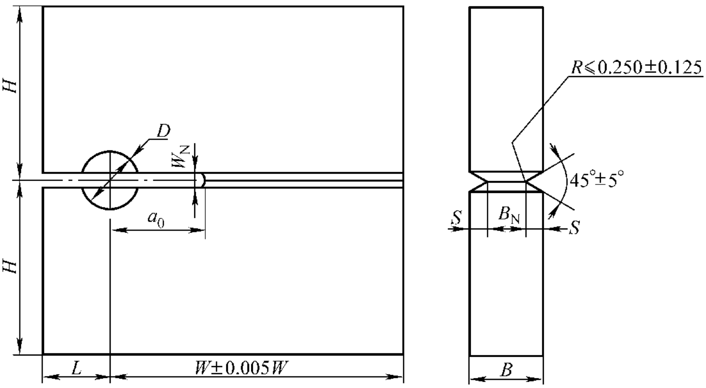



图 9-16　试样形状

$H$—试样的半高度（mm）　$W$—试样宽度（mm）　$B$—试样厚度（mm）

$B_N$—试样净厚度（mm）　$L$—试样加载中心孔距试样前端的距离（mm）

$a_0$—试样缺口长度（mm）

注：$H=0.6W\pm0.005W$，$S=(B-B_N)/2\pm0.01B$，$W_N\leqslant W/10$，$0.15W\leqslant L\leqslant0.25W$，$0.30W\leqslant a_0\leqslant0.40W$，$0.125W\pm0.005W\leqslant D\leqslant0.250W\pm0.005W$。

**3. 缺口**

1）缺口制作方式是缺口脆性焊接，如图 9-17 所示。缺口应有足够宽度 $W_N$，能够使焊条到达狭缝的底部。

2）缺口长度范围为 $0.30W\leqslant a_0\leqslant 0.40W$，有时可以减少至 $0.20W$。

3）也可以采用其他裂纹前端形状和脆化方法。高强钢可使用简单的机加工缺口，高强度低韧性合金试样的缺口可以使用电子束焊接。

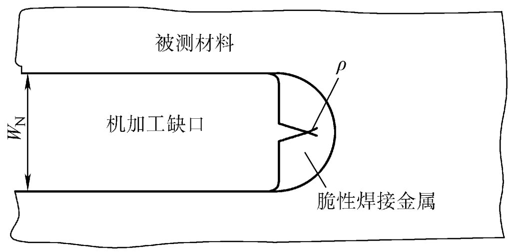



图 9-17　使用缺口脆性焊接引发裂纹

$W_N$—缺口宽度（mm）　$\rho$—缺口根部半径（mm）

## 9.3.2　试验设备

1）在试验过程中，为了减少附加能量的引入，加载系统的柔度比试样柔度要低。为此使用了裂纹线上的楔形加载方式。

2）加载装置如图 9-18 所示。试样放置在垫块上，垫块应有足够厚度，以避免楔块和试验机的下平台接触。垫块上的孔应与试样孔对正，其孔的直径应是试样孔直径的 1.05 ~ 1.15 倍。试验机通过楔块对开口销施力，并由加力系统中的力传感器测量所加的力。

3）楔块、开口销、垫块孔和试样孔的表面都应该润滑，可以使用油脂状二硫化钼或其他润滑剂。

4）小锥度的楔块和开口销配合使用。用油脂或干润滑剂润滑滑动表面（喷丸处理）可以避免磨损，开口销必须足够长，保证与整个试样厚度范围相接触。开口销的直径应比试样孔的直径小 0.13mm。为了满足最大张开位移，楔块必须足够长。空冷或

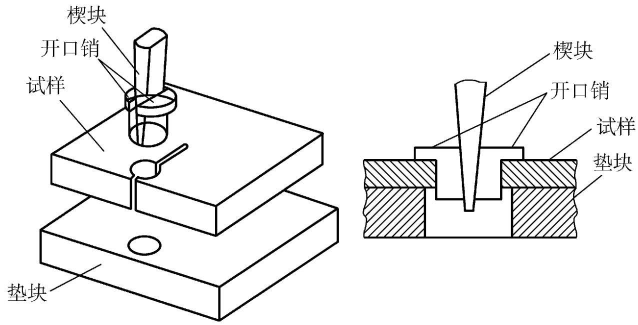



图 9-18　楔块、开口销、试样、垫块排列的示意图

油淬硬化的工具钢都适合制作楔块和开口销，硬度范围为 45 ~ 55HRC。对于尺寸为 125mm < $W$ < 170mm 的试样，直径为 25.4mm 的孔是合适的。图 9-19 所示楔块和开口销的装配尺寸适合于直径为 25.4mm 的加载孔。也可以按比例机加工其他直径的孔。在试验温度远远高于无塑性转变温度时，图 9-19 所示装置不能展示止裂的完整部分。在这种情况下，应使用图 9-20 所示的加载装置。

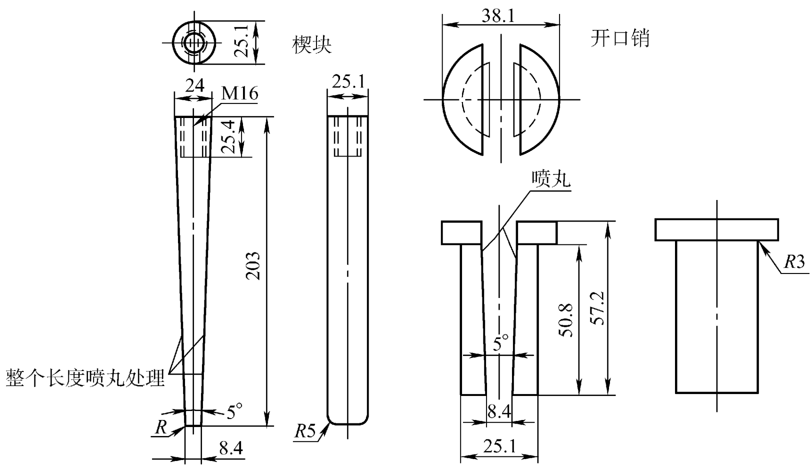



图 9-19　楔块和开口销的几何尺寸

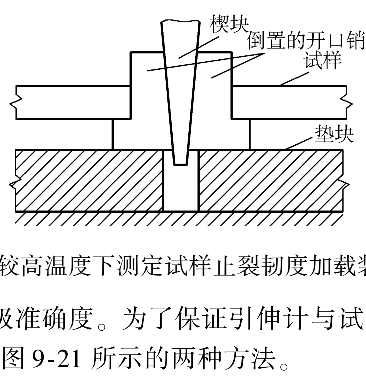



图 9-20　在较高温度下测定试样止裂韧度加载装置的截面图

5）引伸计应不低于 2 级准确度。为了保证引伸计与试样安装接触的方式随裂纹扩展而不发生变化，一般使用图 9-21 所示的两种方法。

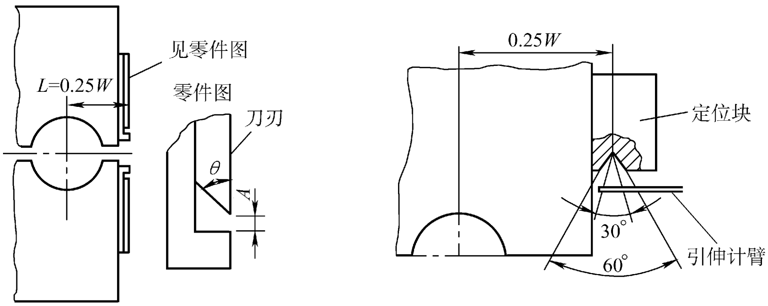



图 9-21　借助刀口和定位块的两种引伸计的安装方式

注：$A$ 应比引伸计臂的厚度小 0.05 ~ 0.25mm。

### 9.3.3　试验内容及结果表示

**1. 试验要求**

1）每个试验温度下，应不少于三个有效试验结果。

2）测量试样宽度 $W$，准确到宽度 $W$ 的 ±1% 以内。

3）测量试样厚度 $B$ 和裂纹平面的净厚度 $B_N$，准确到厚度 $B$ 的 ±1% 以内。

4）试样通过适当方法加热或冷却到选定的试验温度。对于室温（10 ~ 35℃）以上温度的试验，可采用电阻加热方法。对于室温以下温度的试验，可采用将试样放置于低温环境箱的方法（见图 9-22），或者将试样浸泡于冷却介质中的方法。在开始试验之前，试样要在试验温度下要保持足够长的时间，以使试样的温度均匀，温度最大允许偏差 ±3℃。

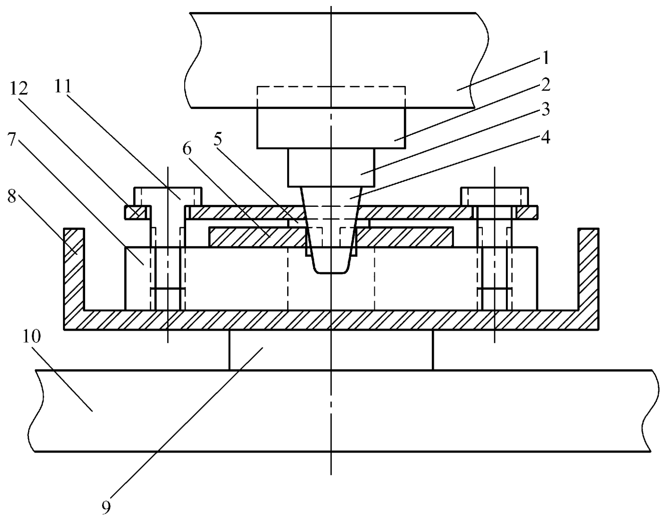



图 9-22　利用循环加载技术便于楔块抽拔的加载装置

1—上横梁　2—力传感器　3—拉压夹头　4—楔块　5—开口销

6—试样　7—垫块　8—恒温箱　9—下夹头　10—下平台　11—螺钉　12—压板

5）对于非室温条件下的断裂韧度试验，试验温度应控制在 ±2℃，并作记录。应在距离裂纹尖端5mm 以内的区域用热电偶或铂电阻温度计与试样表面接触进行温度测量。试验应在适当的低温或高温介质中进行。冷却介质为液体时，要使试样表面温度达到试验温度，每 1mm 厚度浸泡时间至少 30s。冷却介质为气体时，每 1mm 厚度保温时间至少 60s。试样在试验温度下的浸泡时间最少 15min。试样温度在试验过程中应保持在名义试验温度的 ±2℃以内，并按要求记录。

**2. 试验原理**

当结构存在断裂韧度或应力梯度时，裂纹可能在低断裂韧度或高应力区启裂或在两者共存的条件下启裂，在高断裂韧度或低应力区或两者共存的另一区域止裂。一个快速扩展裂纹在很短的时间间隔内止裂时的应力强度因子值是衡量裂纹在该种材料止裂能力的。这种应力强度因子值是使用动态分析方法确定的，该值提供了定义为 $K_A$ 的裂纹止裂断裂韧度值。静态分析方法比较简单，可以在裂纹止裂后约 1 ~ 2ms 之内确定 $K$ 值。这种方式得到的裂纹止裂断裂韧度值的估计值被定义为 $K_a$。当宏观动态效应较小时，$K_A$ 和 $K_a$ 之间的差别也很小。当裂纹前端处于平面应变的条件时，裂纹扩展的动态效应也很小。借助符合试验尺寸的试样进行试验，就可以得到裂纹发生止裂时的 $K_{Ia}$值。

**3. 加载程序**

1）使用循环加载技术，即载荷施加给楔块，直至快速裂纹启裂或裂纹嘴张开位移（引伸计测量）达到预定的值。如果在最大张开位移达到之前，快速断裂还没有开始，就要对试样卸载，直至楔块退离开口销；然后再以同样的方式对试样加载，直至裂纹快速开裂或达到设定的最大张开位移。在每一个加载循环中，允许依次施加较大的张开位移，直至裂纹快速开裂或试验结束。

2）记录力-裂纹张开位移图，不同加载循环之间的记录不要清零，因为累加的零载荷位移偏置对后面的计算是有用的。

3）对楔块施力，直至引伸计测量的裂纹张开位移达到下式的最大值：

$$[(V_0)_1]_{max}=\frac{0.69R_{p0.2}W\sqrt{B_N/B}}{Ef(a_0/W)}$$

式中　$V_0$——起始位移，单位为 mm；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$B_N$——试样净厚度，单位为 mm；

$E$——弹性模量，单位为 MPa；

$a_0$——试样缺口长度，单位为 mm；

$f(a_0/W)$——自变量为 $a_0/W$ 的函数。

在位移控制状态下操作试验机，横梁的位移速度为 2 ~ 12mm/min。

4）拔出楔块对试样卸载，准备第二个加载循环。引伸计应保持不动，在卸载和楔块移动过程中，记录零载荷时的位移偏置。

5）不要对记录清零，重新插入楔块并对楔块施力，以与第一循环相同的位移速率

进行加载。继续加载直至快速裂纹扩展发生或直至位移达到预定的最大值。推荐的最大张开位移在第二循环和随后的循环按下式计算：

$$[(V_0)_n]_{max} = [1.0 + 0.25(n-1)]\left[\frac{0.69R_{p0.2}W\sqrt{B_N/B}}{Ef(a_0/W)}\right]$$

式中　$V_0$——起始位移，单位为 mm；

$n$——循环的次数序号；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$B_N$——试样净厚度，单位为 mm；

$E$——弹性模量，单位为 MPa；

$a_0$——试样缺口长度，单位为 mm；

$f(a_0/W)$——自变量为 $a_0/W$ 的函数。

如果在达到预定位移极限时，不稳定裂纹扩展没有开始，要重新卸载并按 4）步骤拔出楔块，记录不同加载循环下的载荷-位移曲线图，按 4）重复试验。如果要多次进行加载和卸载，需要重新对楔块和开口销进行润滑。

6）在试验记录的曲线图上看见一个突然的载荷下降（载荷下降 50% ~60%，表明产生了足够长的不稳定裂纹），即可以判断不稳定裂纹的产生。止裂发生后，应该立即卸掉载荷，避免裂纹进一步扩展。

7）如果在随后的加载循环中，增加张开位移的同时伴随着载荷的降低，那就意味已发生稳定撕裂，试样快速止裂是不可能的。在这种情况下应停止试验，需要重新对试样进行机加工，去掉焊珠和缺口顶端已发生塑性变形的材料，机加工出新的缺口。为了从该试样获得有效数据，需要在更低的温度下重新试验（降低 20 ~40℃）。若位移超过按下式估计的极限，试验就不可能得到成功的结果了。

$$(V_0)_{limit} = \frac{1.50R_{p0.2}W\sqrt{B_N/B}}{Ef(a_0/W)}$$

式中　$V_0$——起始位移，单位为 mm；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$B_N$——试样净厚度，单位为 mm；

$E$——弹性模量，单位为 MPa；

$a_0$——试样缺口长度，单位为 mm；

$f(a_0/W)$——自变量为 $a_0/W$ 的函数。

未试验成功的试样必须去掉的材料数量大约是缺口尖端附近处于平面应变条件的塑性区的半径，根据 $(K_0/R_{p0.2})^2/6\pi$ 计算得到，其中 $K_0$ 是裂纹启裂应力强度因子，单位为 $N/mm^{3/2}$。必须通过机加工去掉已发生稳态撕裂的足够量的材料。

**4. 标记止裂裂纹**

1）止裂裂纹的位置通过热着色来标记，通过在 260～370℃ 的温度范围，加热时间 10～90min 标记止裂裂纹前缘，可以将时间与温度任意组合。

2）标记完试样的裂纹前缘后，应将试样断成两半，通常需要借助楔形加载装置。对于结构钢，可以通过干冰或液氮冷却加速断裂过程。

**5. 止裂裂纹长度的测量**

在热着色的断口试样厚度中心、中心和侧槽的 1/2 厚度处三个位置测量止裂裂纹长度，准确到 ±1% 以内。由于裂纹前缘的不规则性，在某些位置测量裂纹长度是困难的，此时应取这三个位置为中心，宽为 $B_N/4$ 上的视觉平均值。三次测量的平均值规定为平均止裂裂纹长度 $a_a$。

视觉平均避免了单点测量，单点测量不能准确代表裂纹前缘附近测量的平均位置。为了便于分析，先假定裂纹前缘是平直和光滑的。视觉平均方法是以在测量带的宽度上取平均值作为裂纹尖端位置的（已断材料和未断材料的分界）。视觉平均方法具有一定程度的保守性，这是因为该方法计算的应力强度因子随裂纹长度的增加而降低。

**6. 试验结果的计算和处理**

（1）位移测量　从力-位移自动记录曲线图上，确定几个位移值。图 9-23 是通过对试样连续加载和卸载循环得到的典型力-位移图，直到第四个加载循环，才显示出不稳定裂纹扩展。需要测量的位移如下：

1）$V_{F_1}$ = 第 1 个加载循环结束时的位移偏置 = $V_{R_1}$。

2）$V_{F_{n-1}}$ = 第 $n-1$ 个加载循环结束时的总位移偏置 = 最后加载循环起始时的总位移偏置 = $V_{R_3}$。

3）$V_0$ = 不稳定裂纹扩展起始的位移 = $V_{F_4}$。

4）$V_a$ = 裂纹止裂后大约 0.1s 的位移 = $V_{F_5}$。

5）$V_a - V_0$ = 止裂伴随的裂纹张开的快速增加 = $V_{F_5} - V_{F_4}$。

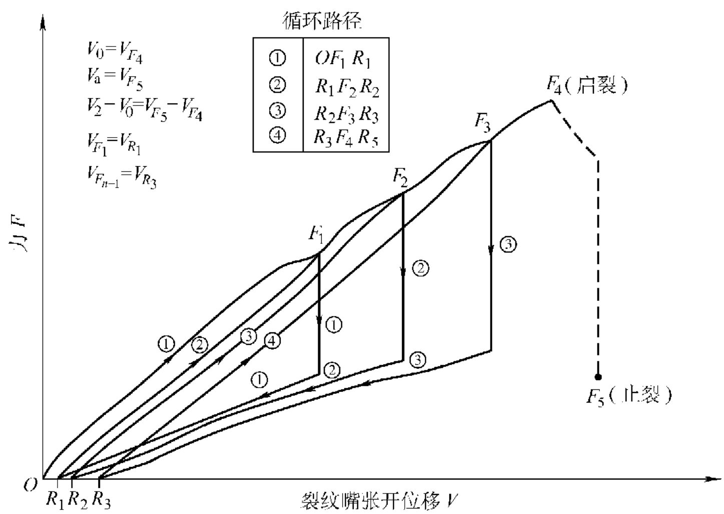



图 9-23　对试样使用循环加载技术得到的力-位移图

注：在第四个加载周期显示了快速止裂。

（2）裂纹启裂应力强因子 $K_0$ 和平面应变止裂断裂韧度条件值 $K_{Qa}$ 的计算　$K_0$ 和 $K_{Qa}$ 按下式计算：

$$K = EVf(x)(B/B_N)^{1/2}/W^{1/2}$$

式中　$K$——应力强度因子，单位为 $N/mm^{3/2}$；

$E$——弹性模量，单位为 MPa；

$V$——位移，单位为 mm；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$B_N$——试样净厚度，单位为 mm；

$f(x)$——自变量为 $x$ 的函数，其中 $x$ 按下式计算：

$$x = a/W$$

式中　$a$——止裂裂纹长度，单位为 mm；

$W$——试样宽度，单位为 mm。

不同的 $x$ 对应的 $f(x)$ 值如表 9-2 所示。

**表 9-2　不同的 $x$ 对应的 $f(x)$ 值**

| $x$ | $f(x)$ | $x$ | $f(x)$ | $x$ | $f(x)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.20 | 0.390 | 0.42 | 0.223 | 0.64 | 0.149 |
| 0.21 | 0.378 | 0.43 | 0.218 | 0.65 | 0.147 |
| 0.22 | 0.367 | 0.44 | 0.214 | 0.66 | 0.144 |
| 0.23 | 0.357 | 0.45 | 0.210 | 0.67 | 0.141 |
| 0.24 | 0.347 | 0.46 | 0.206 | 0.68 | 0.139 |
| 0.25 | 0.337 | 0.47 | 0.202 | 0.69 | 0.136 |
| 0.26 | 0.328 | 0.48 | 0.198 | 0.70 | 0.133 |
| 0.27 | 0.319 | 0.49 | 0.194 | 0.71 | 0.131 |
| 0.28 | 0.310 | 0.50 | 0.191 | 0.72 | 0.128 |
| 0.29 | 0.302 | 0.51 | 0.188 | 0.73 | 0.125 |
| 0.30 | 0.294 | 0.52 | 0.184 | 0.74 | 0.122 |
| 0.31 | 0.287 | 0.53 | 0.181 | 0.75 | 0.119 |
| 0.32 | 0.280 | 0.54 | 0.178 | 0.76 | 0.117 |
| 0.33 | 0.273 | 0.55 | 0.175 | 0.77 | 0.114 |
| 0.34 | 0.266 | 0.56 | 0.172 | 0.78 | 0.111 |
| 0.35 | 0.260 | 0.57 | 0.169 | 0.79 | 0.108 |
| 0.36 | 0.254 | 0.58 | 0.166 | 0.80 | 0.105 |
| 0.37 | 0.248 | 0.59 | 0.163 | 0.81 | 0.102 |
| 0.38 | 0.243 | 0.60 | 0.160 | 0.82 | 0.098 |
| 0.39 | 0.237 | 0.61 | 0.158 | 0.83 | 0.095 |
| 0.40 | 0.232 | 0.62 | 0.155 | 0.84 | 0.092 |
| 0.41 | 0.227 | 0.63 | 0.152 | 0.85 | 0.088 |

1）使用 $a=a_0$（试样缺口长度），$V=V_0-V_{F_{n-1}}$ 计算 $K_0$。

2）使用 $a=a_a$，$V=0.5[V_0+V_n-V_{F_1}-V_{F_{n-1}}]$ 计算 $K_{Qa}$。如果在第一加载循环，就发生了快速止裂，$V_{F_{n-1}}$ 和 $V_{F_1}$ 均取值为零。

（3）有效性判据　按计算得到的 $K_{Qa}$ 值，如果完全满足表 9-3 的判据，就认为是平面应变止裂韧度值 $K_{Ia}$。

**表 9-3　保证 $K_{Qa}$ 是线弹性平面应变止裂韧度值的判据**

| 特　征 | 判　据 | 特　征 | 判　据 |
|---|---|---|---|
| 未断韧带 | (A) $W-a_a \geqslant 0.15W$ | 裂纹扩展量 | (D) $a_a-a_0 \geqslant 2W_N$ |
| 未断韧带 | (B) $W-a_a \geqslant 1.25(K_a/R_{Yd})^2$ | 裂纹扩展量 | (E) $a_a-a_0 \geqslant (K_0/R_{p0.2})^2/2\pi$ |
| 厚度 | (C) $B \geqslant 1.0(K_a/R_{Yd})^2$ | | |

注：$W_N$ 是缺口宽度，单位为 mm；$R_{Yd}$ 是动态屈服强度，单位为 MPa。

# 9.4　金属材料准静态断裂韧度试验

金属材料准静态断裂韧度试验按照 GB/T 21143—2007《金属材料　准静态断裂韧度的统一试验方法》进行。

## 9.4.1　试样

### 1. 试样的形状和尺寸

金属材料准静态断裂韧度试样如图 9-24 ~ 图 9-26 所示。

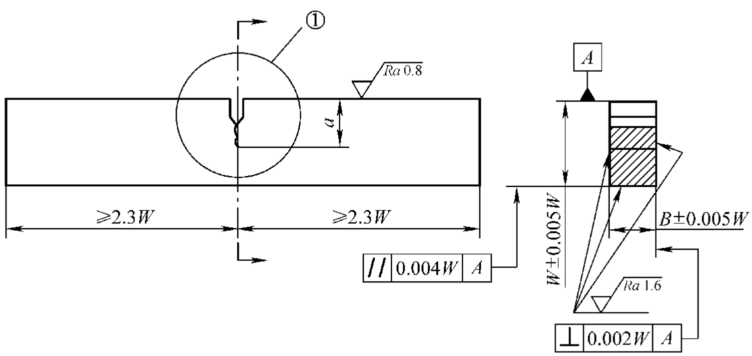



图 9-24　三点弯曲试样

注：1. 引发裂纹缺口尖端的纵切面（A 面）与试样左右两端面保持等间距且距离之差在 0.005W 以内。

2. 可以采用整体刀口或附加刀口固定引伸计，见图 9-28 和图 9-29。

3. 初始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 9-27。

4. $1.0 \leqslant W/B \leqslant 4.0$（推荐 $W/B=2$）。

5. $0.45 \leqslant a/W \leqslant 0.70$。

① 见图 9-27 和图 9-28。

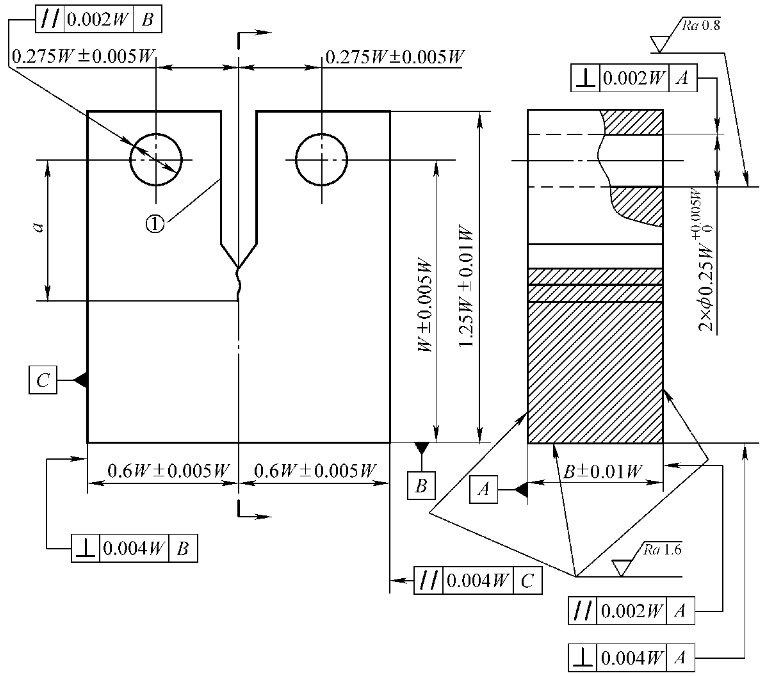



图 9-25　直通形缺口紧凑拉伸试样

注：1. 引发裂纹缺口尖端的纵切面（A 面）与试样左右两端面保持等间距且距离之差在 0.005W 以内。

2. 可以采用整体刀口或附加刀口固定引伸计，见图 9-28 和图 9-29。

3. 初始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 9-27。

4. $0.8 \leqslant W/B \leqslant 4.0$（推荐 $W/B = 2$）。

5. $0.45 \leqslant a/W \leqslant 0.70$。

6. 可以选择的销孔直径为 $\phi 0.188W^{+0.004W}_{0}$。

① 见图 9-27 和 9-28。

平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 试验的最小推荐厚度如表 9-4 所示。

**表 9-4　平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 试验的最小推荐厚度**

| 塑性延伸强度/弹性模量/(MPa/MPa) | 厚度/mm |
|---|---|
| 0.0050 ~ <0.0057 | 75 |
| 0.0057 ~ <0.0062 | 63 |
| 0.0062 ~ <0.0065 | 50 |
| 0.0065 ~ <0.0068 | 44 |
| 0.0068 ~ <0.0071 | 38 |
| 0.0071 ~ <0.0075 | 32 |
| 0.0075 ~ <0.0080 | 25 |
| 0.0080 ~ <0.0085 | 20 |
| 0.0085 ~ <0.0100 | 13 |
| 0.0100 | 7 |

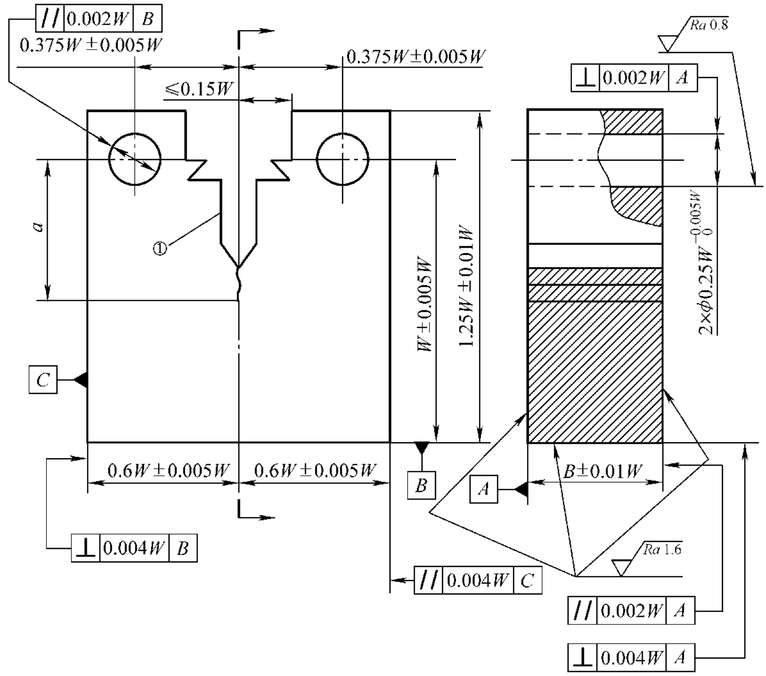



图 9-26　台阶形缺口紧拉试样

注：1. 引发裂纹缺口尖端的纵切面（$A$ 面）与试样左右两端面保持等间距且距离之差在 0.005$W$ 以内。
2. 可以采用整体刀口或附加刀口固定引伸计，见图 9-28 和图 9-29。
3. 初始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 9-27。
4. $0.8 \leqslant W/B \leqslant 4.0$（推荐 $W/B=2$）。
5. $0.45 \leqslant a/W \leqslant 0.70$。
6. 第二个台阶对于一些引伸计是没必要的；图 9-27 显示了疲劳裂纹前端缺口的包迹线图。
7. 可以选择的销孔直径为 $\phi 0.188W^{+0.004W}_{0}$。当使用这个尺寸的销子时，最大缺口张开位移应增加到 0.21$W$。

① 见图 9-27 和图 9-28。

**2. 试样制备**

1）从最终热处理状态和（或）机加工状态下的材料上截取。

2）不能从其最终热处理状态下截取时，最终热处理可以在机加工后满足了试样的尺寸、公差、形状和表面粗糙度要求时，并充分考虑了由于特殊的热处理（例如钢的水淬）而带来的试样尺寸变化等影响后进行。

3）残余应力可能影响准静态断裂韧度的测量。当试件从具有明显残余应力的区域截取时，影响是显著的。例如，焊接件、形状复杂的型钢（如热模锻、阶段式挤压、铸造）等，它们不可能完全释放应力或有局部感应残余应力。

4）从有残余应力的产品上截取的试样可能也有残余应力。在试样的截取过程中可能部分释放或重新分配残余应力的存在，仍然可能导致试验数据的重大偏差。残余应力叠加到外加应力上，作用于裂纹尖端应力场，明显不同于单纯的外加力或位移。试样机加工中的变形、试样几何形状的依赖性及在预制疲劳裂纹过程中的不规则裂纹扩展

(如裂纹前缘过渡弯曲或偏离扩展平面)，经常是受残余应力的影响所致。在外加力为零时的缺口张开位移（裂纹闭合效应）表征残余应力的存在，并可能影响随后的断裂韧度测定。

5）试样的缺口外形不应超过图 9-27 所示的包迹线。通过铣床加工的缺口底径不应大于 0. 10mm。锯、磨或火花腐蚀加工的缺口宽度不应大于 0. 15mm。试样缺口平面应垂直于试样表面，偏差在 2°以内。

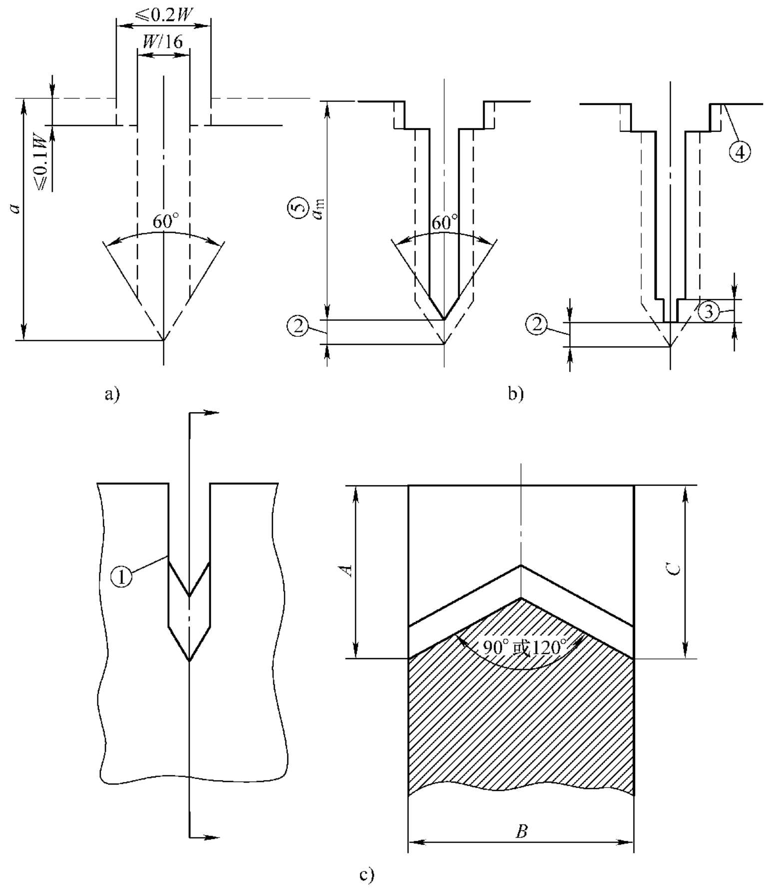



图 9-27　疲劳裂纹包迹和裂纹引发缺口

a）包迹线　b）缺口几何形状　c）山形缺口

注：1. $A=C\pm0.010W$。

2. 山形缺口底径不应大于 0. 25mm。

3. 切口尖端的角度最大为 90°。

4. 如果疲劳裂纹萌生和（或）扩展很困难，可以使用图 c 所示的山形缺口。

① 机加工缺口。

② 疲劳预制裂纹。

③ 火花腐蚀或机加工的狭缝。

④ 三点弯曲试样的边沿或紧凑拉伸试样的加力线。

⑤ $a_m$ 应大于 $A$ 和 $C$。

6）试样刀口可以是整体的，也可以是附加的，如图 9-28 和图 9-29 所示。图 9-28 和图 9-29 中的 $2x$ 寸应当在引伸计的工作范围以内，刀口边沿与试样表面成直角，并且应保持相互平行偏差在 0.5°以内。对于这两种类型图对应的引伸计，应保证引伸计与刀口接触点之间能自由转动。

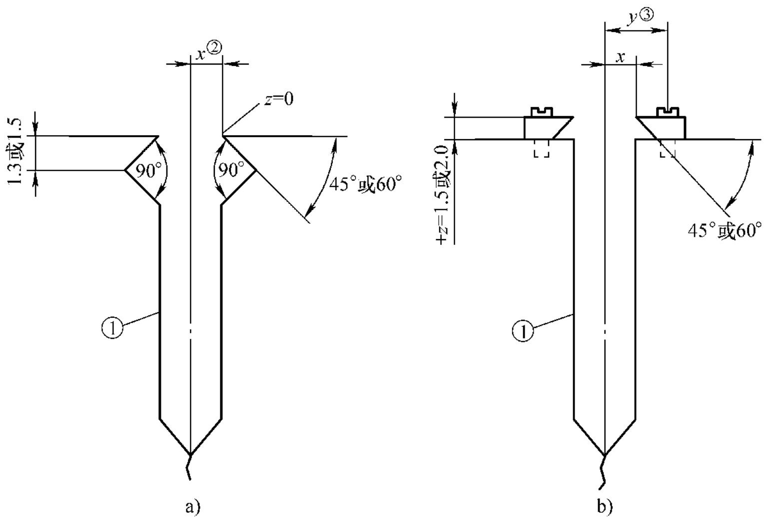



图 9-28　外置刀口和相应的缺口几何尺寸

a）整体刀口　b）螺钉固定刀口

注：如果刀口是通过粘结或类似的方式固定在试样边沿，则 $2y$ 等于刀口两外端点之间的距离。

① 见图 9-27。

② $2x$ 见试样制备中的 6）。

③ $2y$ + 螺纹直径 = $W/2$。

7）疲劳预制裂纹应在试样最终热处理及机加工后或特定环境条件下进行。疲劳预制裂纹后，断裂试验前的中间处理仅在需要模拟特殊的结构应用时才是必要的。这一处理应在试验报告中注明。在整个预制疲劳裂纹过程中最大疲劳裂纹预制力应准确至 ±2.5%。

## 9.4.2　试验设备

1）对于三点弯曲试样使用的加载装置，在加载过程中允许支承辊自由向外移动（见图 9-30），并保持整个试验过程中辊的接触，以减少摩擦力的影响。辊的直径应为 $W/2 \sim W$ 之间。加载装置受力面的硬度应大于 40HRC（400HV）或试样硬度，取其大者。

2）紧凑拉伸试样加载时使用的 U 形钩和加载销应尽量减小摩擦。试样在受拉力作用时，试验装置应保证同轴。用于测定阻力曲线的 U 形钩的销孔应是平底的（见图 9-31），以保证加载销在整个加载过程能自由转动。圆底销孔的 U 形钩（见图 9-32）不允许用于单试样法的试验。

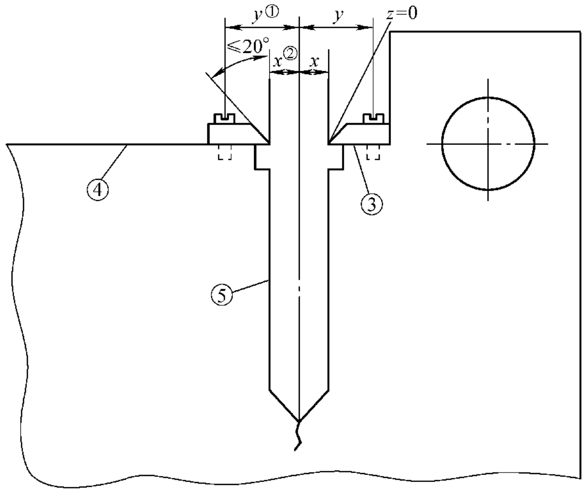



图 9-29　内置刀口和相应的缺口几何尺寸

注：1. 如果刀口是通过粘结或类似的方式固定在试样边沿，则 $2y$ 等于刀口两端点之间的距离。
2. 如果用刀片代替内置刀口，则通常在加力线上刀片厚度一半处测量位移。
① $2y$ + 螺纹直径 = $W/2$。
② $2x$ 见试样制备中的 6)。
③ 见图 9-27。
④ 加载线。
⑤ 台阶紧凑拉伸试样的加载线。

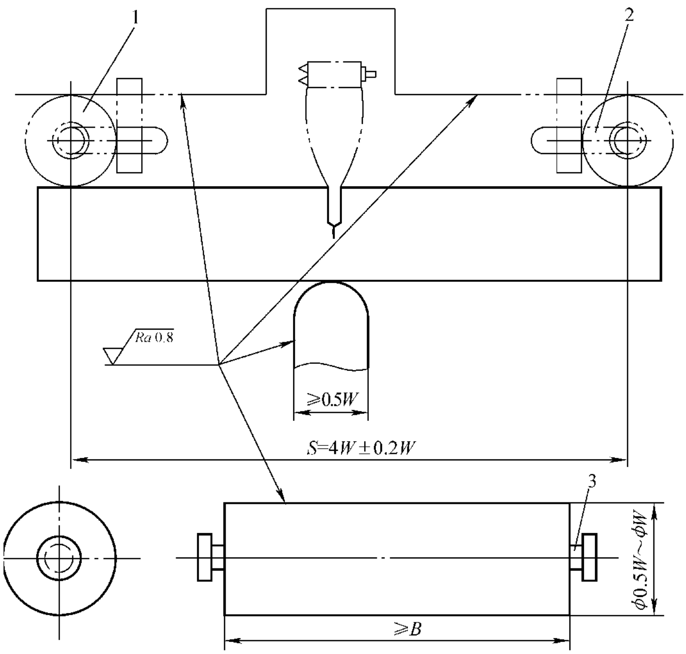



图 9-30　三点弯曲试验装置

1—辊　2—橡皮筋或弹簧　3—固定橡皮筋或弹簧的箍

注：1. 两辊及上压头与试样的接触面应互相平行，且平行度误差不大于 ±0. 002$W$。

2. 试验装置和辊的硬度不小于 40HRC 或试样硬度，取其大者。

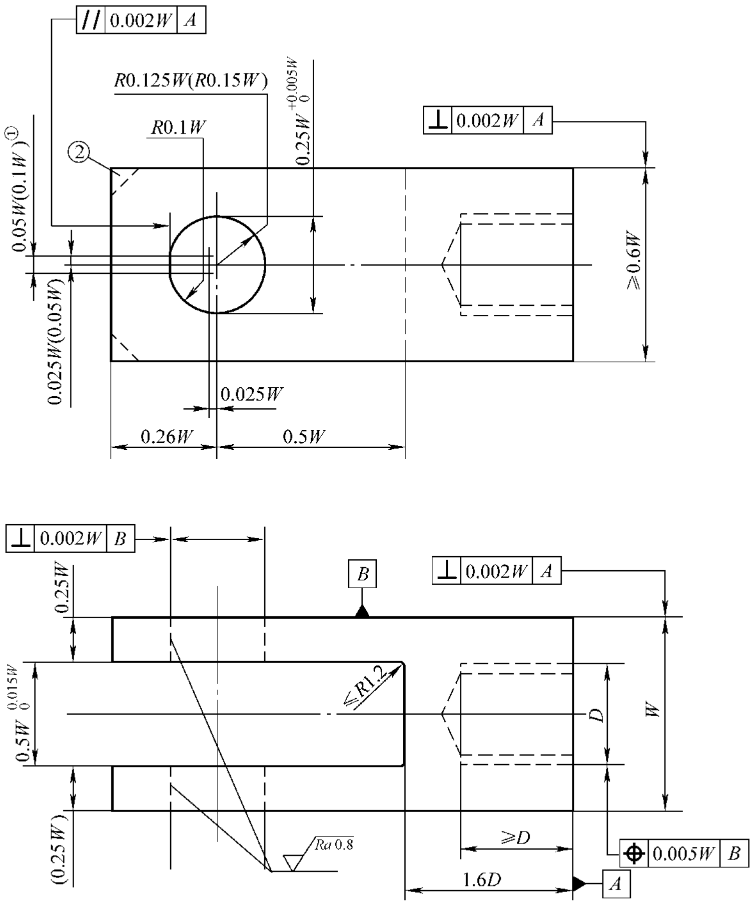



图 9-31　用于紧凑拉伸试样的平底加载销孔 U 形钩的典型设计

注：1. 加载销的直径 = $0.24W_{-0.005W}^{\ 0}$。

2. U 形钩和加载销的硬度不小于 40HRC 或试样硬度，取其大者。

3. 对于大位移量的试样，U 形钩销孔的直径应放大到括号内的尺寸。

① 加载平面。

② 为便于安装引伸计可以将 U 形钩的角去掉。

## 9.4.3　试验内容及结果表示

### 1. 试验温度

在环境温度试验条件下，试验温度应控制在 ±2℃，并作记录。为此，应在距离裂纹尖端 5mm 以内的区域用热电偶或铂电阻温度计与试样表面接触进行测量。试验应在适当的低温或高温介质下进行。

冷却介质为液体时，当试样表面温度达到试验温度，每 1mm 厚度浸泡时间至少为 30s。冷却介质为气体时，每 1mm 厚度保温时间至少为 60s。在试验温度下的浸泡时间最少为 15min。试样温度应保持在试验温度的 ±2℃ 以内。

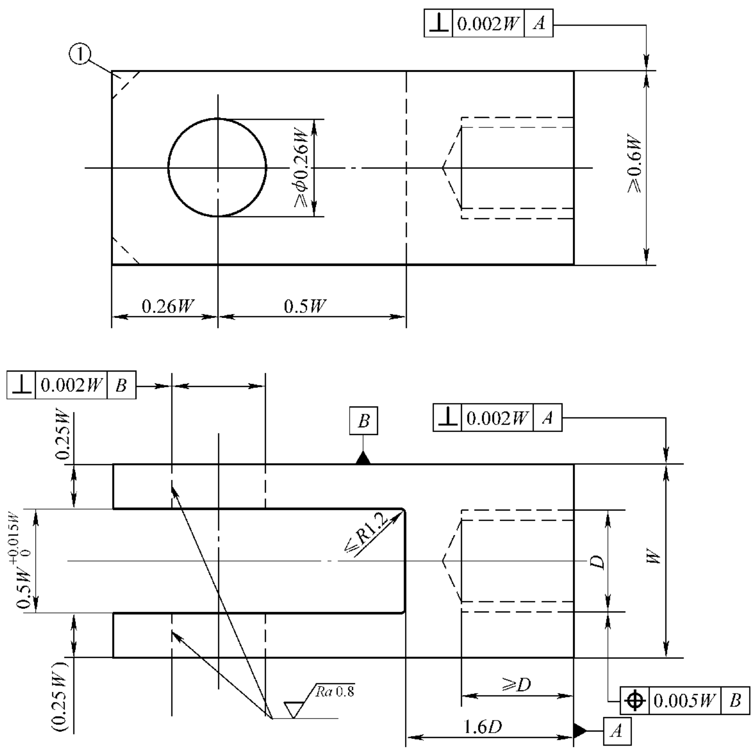



图 9-32　用于紧凑拉伸试样的圆底加载销孔 U 形钩的典型设计

注：1. 加载销的直径 $=0.24W^{\ 0}_{-0.005W}$。
2. U 形钩和加载销的硬度不小于 40HRC 或试样硬度，取其大者。
① 为便于安装引伸计可以将 U 形钩的角去掉。

**2. 试验速率**

试验应在缺口张开位移、施力点位移或横梁位移的控制条件下进行。施力点位移速率应该保证在线弹性区，应力强度因子速率在 0.2 ~ 3MPa · $m^{1/2}$/s 之间。对于同一组试验，所有试样都应在同一标称速率下加载。

**3. 试验后的裂纹测量**

试样在试验后应被打断，进行断口检查，测定原始裂纹长度 $a_0$ 及在试验过程中发生的稳定裂纹扩展量 $\Delta a$。对于某些试验，有必要在试样打断之前标记出稳定裂纹扩展的范围。稳定裂纹扩展量可以通过着色或试验后二次疲劳的方法标记。注意尽量减小试验后试样的变形。对于铁素体钢，通过冷却脆化的方法有助于试样打断时试样变形的减小。

（1）初始裂纹长度 $a_0$　测量初始裂纹长度 $a_0$ 时，应该测量到疲劳裂纹的尖端，测量仪器的准确度应不低于 ±0.1% 或 0.025mm，取其大者。图 9-33 和图 9-34 显示了 9 点测量位置。$a_0$ 值是通过先对距离两侧表面 0.01$B$ 位置（对于开侧槽试样，从侧槽根部算）取平均值，再和内部等间距的 7 点测量长度取平均值得到的。

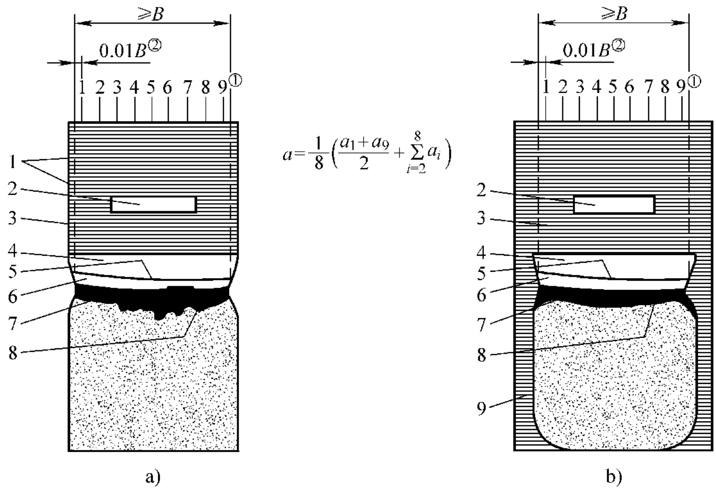



图 9-33　三点弯曲试样裂纹长度的测量

a）普通试样　b）开侧槽试样

1—参考线　2—裂纹平面区域　3—机加工缺口　4—疲劳预制裂纹
5—初始裂纹前缘　6—伸张区　7—裂纹扩展区　8—最终裂纹前缘　9—侧槽

① 在 1 ~9 的位置测量初始和最终裂纹长度。

② 未按比例。

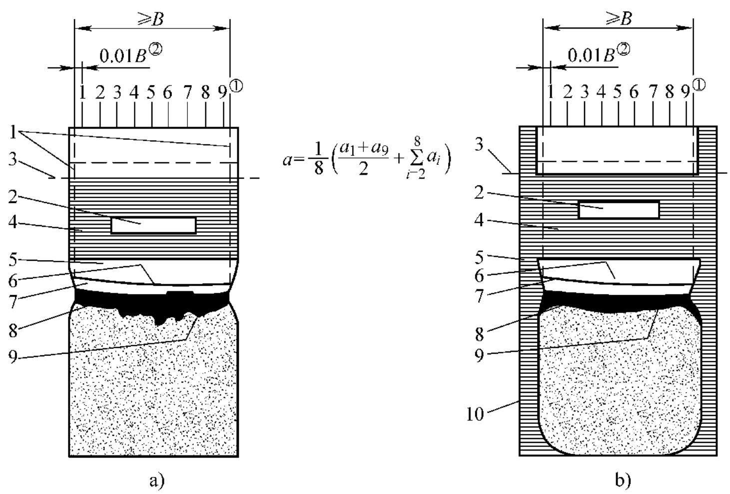



图 9-34　紧拉试样裂纹长度的测量

a）普通试样　b）开侧槽试样

1—参考线　2—裂纹平面区域　3—销孔的中心线　4—机加工缺口　5—疲劳预制裂纹
6—初始裂纹前缘　7—伸张区　8—裂纹扩展区　9—最终裂纹前缘　10—侧槽

① 在 1 ~9 的位置测量初始和最终裂纹长度。

② 未按比例。

（2）稳定裂纹扩展长度　应借助测量准确度 ±0.025mm 的仪器按照 9 点平均值方法测量初始裂纹长度 $a_0$ 和终止裂纹长度 $a_f$。按下式计算稳定裂纹扩展长度 $\Delta a$：

$$\Delta a = a_f - a_0$$

式中　$\Delta a$——稳定裂纹扩展长度，单位为 mm；

$a_0$——初始裂纹长度，单位为 mm；

$a_f$——终止裂纹长度，单位为 mm。

（3）非稳定裂纹扩展　当有证据表明不稳定裂纹的止裂和 pop-in（突变）特性（见图 9-35）有联系时，在每一个 pop-in 之前的整个扩展量 $\Delta a$ 都应进行记录。

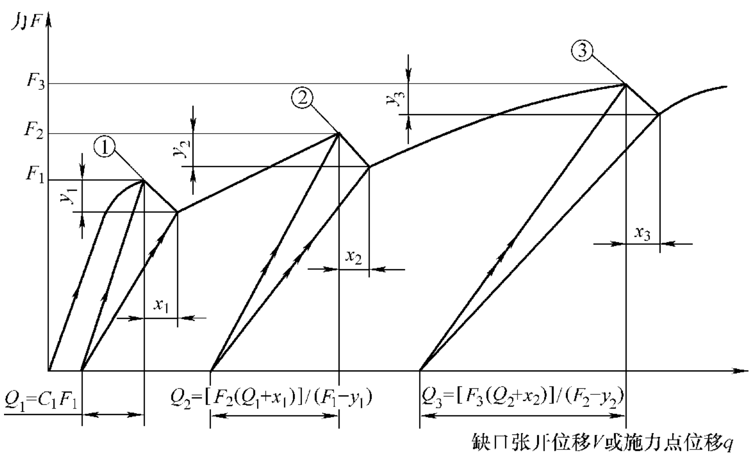



图 9-35　pop-in 特性的估计

注：1. $C$ 是初始柔度。

2. $Q_1$ 代表 $V$ 或 $q$。

3. 为了清晰将 pop-in 夸张。

① pop-in1。

② pop-in2。

③ pop-in3。

**4. 平面断裂韧度的测量**

（1）$F_Q$ 的定义　如图 9-36 所示，从原点做直线 $OF_d$，该直线的斜率比记录曲线的线性部分 $OA$ 的斜率低 $\Delta F/F$ 倍，$\Delta F/F$ 的值应满足下列要求：

1）对于三点弯曲试样的力 $F$ 与缺口张开位移 $V$ 曲线：$\Delta F/F = 0.05$。

2）对于三点弯曲试样的力 $F$ 与施力点位移 $q$ 曲线：$\Delta F/F = 0.04$。

3）对于紧凑拉伸试样，力 $F$ 与缺口张开位移 $V$ 及力 $F$ 与施力点位移 $q$ 曲线：$\Delta F/F = 0.05$。

图 9-35 中的 Ⅰ 型和 Ⅱ 型曲线 $F_d$ 之前的最大力是 $F_Q$，图中的 Ⅲ 型曲线 $F_d = F_Q$。

（2）$K_Q$ 的计算　平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 的条件值 $K_Q$ 按下面方法计算。

1）对于三点弯曲试样，按下式计算：

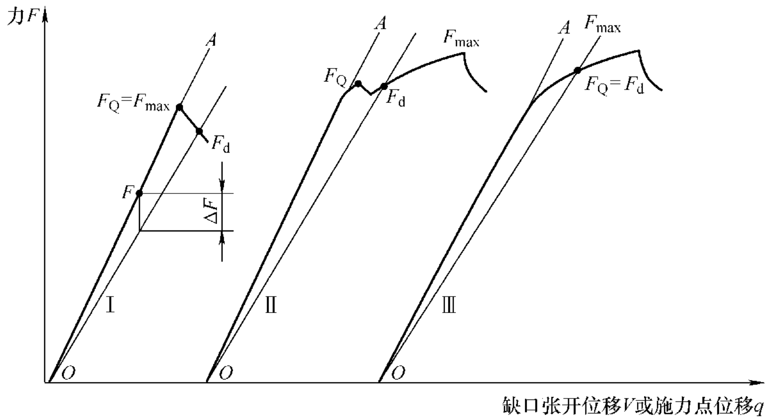



图 9-36 $F_Q$ 的定义

$$K_Q=\left[\left(\frac{S}{W}\right)\frac{F_Q}{(BB_NW)^{0.5}}\right]\left[g_1\left(\frac{a_0}{W}\right)\right]$$

式中 $K_Q$——平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 的条件值，单位为 $MPa\cdot m^{1/2}$；

$F_Q$——条件力，单位为 kN；

$S$——跨距，单位为 mm；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$B_N$——两侧槽之间试样的净厚度，单位为 mm；

$g_1\left(\frac{a_0}{W}\right)$——应力强度因子系数，由表 9-5 查出。

**表 9-5 应力强度因子系数**（三点弯曲试样）

| $a/W$ | $g_1(a_0/W)$ | $a/W$ | $g_1(a_0/W)$ |
|---|---|---|---|
| 0.450 | 2.29 | 0.515 | 2.79 |
| 0.455 | 2.32 | 0.520 | 2.84 |
| 0.460 | 2.35 | 0.525 | 2.89 |
| 0.465 | 2.39 | 0.530 | 2.94 |
| 0.470 | 2.43 | 0.535 | 2.99 |
| 0.475 | 2.46 | 0.540 | 3.04 |
| 0.480 | 2.50 | 0.545 | 3.09 |
| 0.485 | 2.54 | 0.550 | 3.14 |
| 0.490 | 2.58 | 0.555 | 3.20 |
| 0.495 | 2.62 | 0.560 | 3.25 |
| 0.500 | 2.66 | 0.565 | 3.31 |
| 0.505 | 2.70 | 0.570 | 3.37 |
| 0.510 | 2.75 | 0.575 | 3.43 |

（续）

| $a/W$ | $g_1(a_0/W)$ | $a/W$ | $g_1(a_0/W)$ |
|---|---|---|---|
| 0.580 | 3.50 | 0.645 | 4.53 |
| 0.585 | 3.56 | 0.650 | 4.63 |
| 0.590 | 3.63 | 0.655 | 4.73 |
| 0.595 | 3.70 | 0.660 | 4.84 |
| 0.600 | 3.77 | 0.665 | 4.95 |
| 0.605 | 3.85 | 0.670 | 5.06 |
| 0.610 | 3.92 | 0.675 | 5.18 |
| 0.615 | 4.00 | 0.680 | 5.30 |
| 0.620 | 4.08 | 0.685 | 5.43 |
| 0.625 | 4.16 | 0.690 | 5.57 |
| 0.630 | 4.25 | 0.695 | 5.71 |
| 0.635 | 4.34 | 0.700 | 5.85 |
| 0.640 | 4.43 | | |

2）对于紧凑拉伸试样，按下式计算：

$$K_Q=\left[\frac{F_Q}{(BB_NW)^{0.5}}\right]\left[g_2\left(\frac{a_0}{W}\right)\right]$$

式中　$K_Q$——平面应变断裂韧度 $K_{IC}$ 的条件值，单位为 $MPa\cdot m^{1/2}$；

$F_Q$——条件力；单位为 kN；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$B_N$——两侧槽之间试样的净厚度，单位为 mm；

$g_2\left(\frac{a_0}{W}\right)$——应力强度因子系数，由表 9-6 查出。

**表 9-6　应力强度因子系数**（紧凑拉伸试样）

| $a/W$ | $g_2(a_0/W)$ | $a/W$ | $g_2(a_0/W)$ |
|---|---|---|---|
| 0.450 | 8.34 | 0.490 | 9.37 |
| 0.455 | 8.46 | 0.495 | 9.51 |
| 0.460 | 8.58 | 0.500 | 9.66 |
| 0.465 | 8.70 | 0.505 | 9.81 |
| 0.470 | 8.83 | 0.510 | 9.96 |
| 0.475 | 8.96 | 0.515 | 10.12 |
| 0.480 | 9.09 | 0.520 | 10.29 |
| 0.485 | 9.23 | 0.525 | 10.45 |

（续）

| $a/W$ | $g_2(a_0/W)$ | $a/W$ | $g_2(a_0/W)$ |
|---|---|---|---|
| 0.530 | 10.63 | 0.620 | 14.80 |
| 0.535 | 10.80 | 0.625 | 15.11 |
| 0.540 | 10.98 | 0.630 | 15.44 |
| 0.545 | 11.17 | 0.635 | 15.77 |
| 0.550 | 11.36 | 0.640 | 16.12 |
| 0.555 | 11.56 | 0.645 | 16.48 |
| 0.560 | 11.77 | 0.650 | 16.86 |
| 0.565 | 11.98 | 0.655 | 17.25 |
| 0.570 | 12.20 | 0.660 | 17.65 |
| 0.575 | 12.42 | 0.665 | 18.07 |
| 0.580 | 12.65 | 0.670 | 18.52 |
| 0.585 | 12.89 | 0.675 | 18.97 |
| 0.590 | 13.14 | 0.680 | 19.44 |
| 0.595 | 13.39 | 0.685 | 19.94 |
| 0.600 | 13.65 | 0.690 | 20.45 |
| 0.605 | 13.93 | 0.695 | 20.99 |
| 0.610 | 14.21 | 0.700 | 21.55 |
| 0.615 | 14.50 | | |

（3）平面应变断裂韧度 $K_{IC}$的有效值判定　如果满足下列条件：

$$a_0=2.5\left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}}\right)^2 \text{且 } B=2.5\left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}}\right) \text{且}(W-a_0)=2.5\left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}}\right)^2$$

式中　$K_Q$——平面应变断裂韧度 $K_{IC}$的条件值，单位为 MPa · $m^{1/2}$；

$a_0$——初始裂纹长度，单位为 mm；

$W$——裂纹宽度，单位为 mm；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa。

$K_Q$ 就是平面应变断裂韧度 $K_{IC}$。

## 9.5　金属材料焊接接头准静态断裂韧度试验

金属材料焊接接头准静态断裂韧度试验按照 GB/T 28896—2012《金属材料　焊接接头准静态断裂韧度测定的试验方法》进行。

### 9.5.1　试样

**1. 试样种类**

1）只需考虑裂纹尖端位于特定宏观位置而不考虑显微组织的试样，称为 WP 试样。

2）需金相检查来确定裂纹尖端位于特定显微组织的试样，称为 SM 试样。

**2. 缺口处待测区域分类**

1）WP 试样缺口在特定焊接区域的某参考位置（例如焊缝金属中心线位置）。

2）SM 试样缺口全部或部分疲劳裂纹前缘在试样中心 75% 范围内的指定显微组织区域内。

3）对于对中不好的双道或者多道焊焊缝，当 WP 试样缺口取在焊缝金属中心线且细晶区占主导的位置时，可能得到错误的（过高的）断裂韧度值。对于这种焊接接头，应使用 SM 试样进行断裂韧度测试。

4）典型的试样缺口位置示例如图 9-37 和图 9-38 所示。

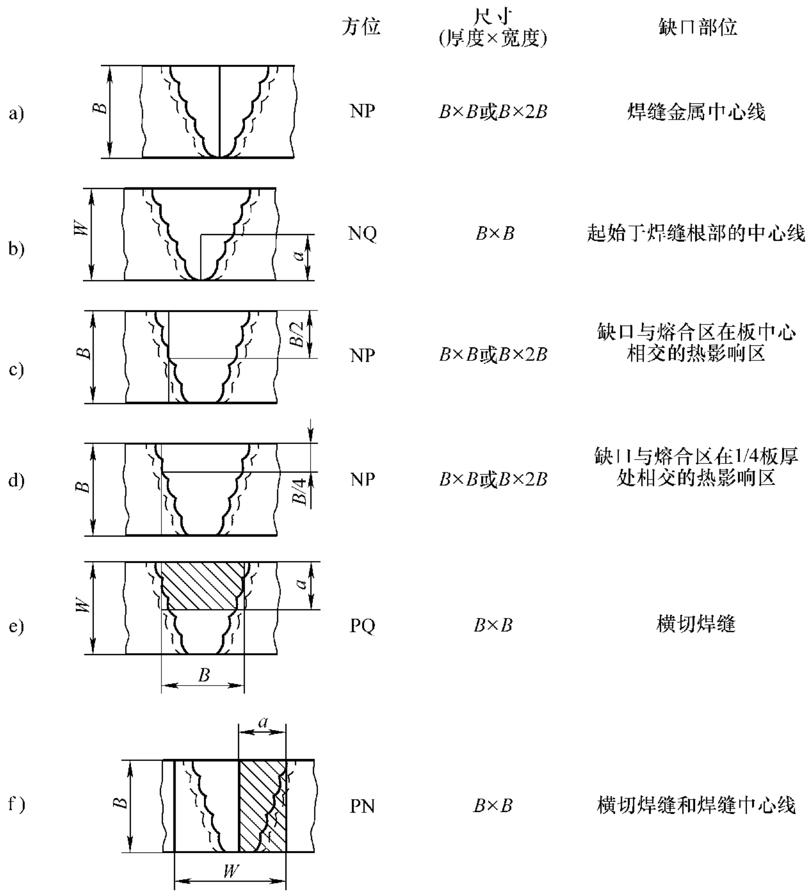



图 9-37　WP 试样缺口位置示例

N—垂直焊缝方向　P—平行焊缝方向　Q—焊缝厚度方向

**3. 试样设计**

应将试样设计成单边缺口弯曲试样或紧凑拉伸试样类型，试样侧面应刨平或开侧槽。沿试板厚度开缺口的弯曲试样称为贯穿厚度缺口试样（见图 9-39 ~ 图 9-41，母材

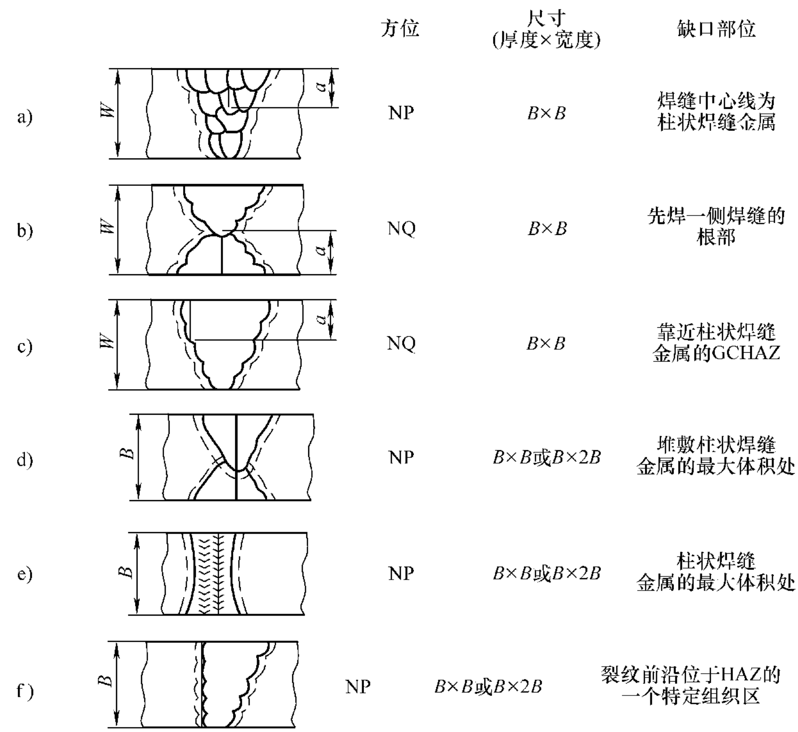



图 9-38　SM 试样缺口位置示例

N—垂直焊缝方向　P—平行焊缝方向　Q—焊缝厚度方向

试样为 XY 和 YX，焊缝试样为 NP 和 PN)，在试板表面开缺口的弯曲试样称为表面缺口试样（见图 9-39 ~ 图 9-41，母材试样为 XZ 和 YZ，焊缝试样为 NQ 和 PQ）。

容许采用小尺寸（即 $B$ 或 $W$ 小于图 9-39 ~ 图 9-41 中所指示的 Z 方向母材厚度和 Q

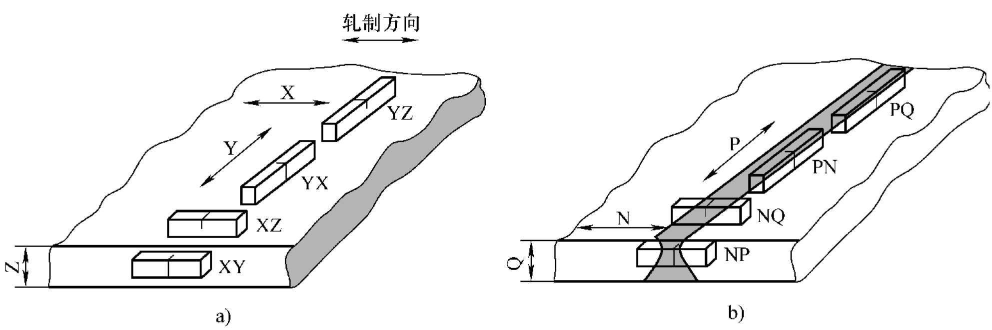



图 9-39　母材和焊缝断裂韧度试样裂纹面取样方位

a) 母材　b) 焊缝

N—垂直焊缝方向　P—平行焊缝方向　Q—焊缝厚度方向

注：第一个字母表示裂纹平面的法向，第二个字母表示预期裂纹扩展的方向。NP 和 PN 为贯穿厚度缺口试样，NQ 和 PQ 为表面缺口试样。

方向焊缝厚度）及（或）开侧面槽的试样进行断裂韧度试验，但应在试验报告中注明。使用小尺寸及（或）侧面开槽试样进行断裂韧度测定所得到的试验结果，可能会由于尺寸效应或者因为试验部分显微组织区域的不同，而与使用全厚度试样获得的断裂韧度值存在一定的差异。

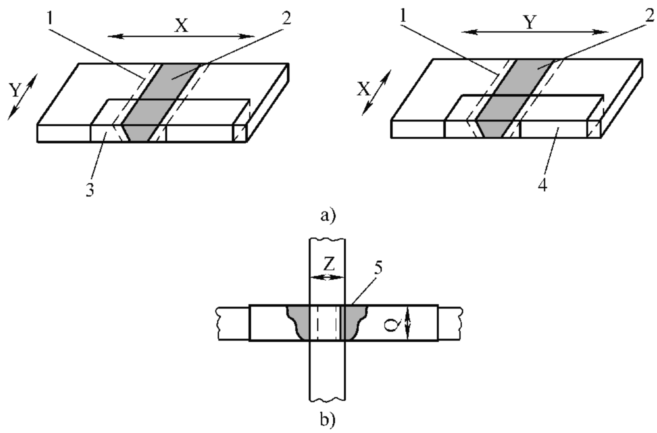



图 9-40　典型对接接头和十字接头断裂韧度试样裂纹面

a）典型对接接头　b）十字接头

1—热影响区　2—焊缝金属　3—焊缝试样取样方向 NP/XY

4—焊缝试样取样方向 NP/YX　5—贯穿厚度裂纹 NP/ZX 或 NP/ZY　X—轧制方向　Q—焊接厚度方向

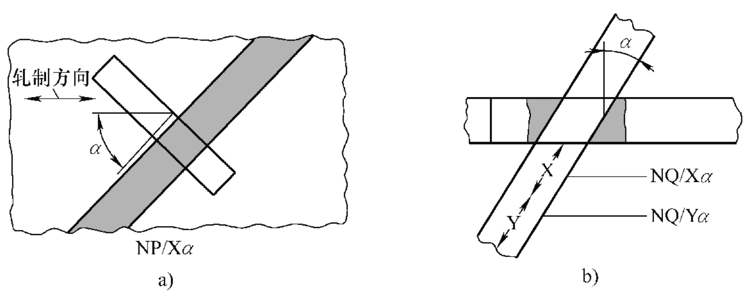



图 9-41　HAZ 断裂韧度试样裂纹面与母材轧制方向成 α 角

a）典型对接接头　b）倾斜的十字接头

**4. 机加工前金相检查**

当试验采用 SM 试样时，应该在垂直于焊接方向的平面上选取宏观试样或者在焊接试板末端截取试样进行金相检查。横截面位置应该在即将进行试验的焊缝长度范围内选取，以确保特定显微组织出现在疲劳裂纹尖端部位来满足试验要求。在制备宏观金相检查试样时，应注意及时地将取样位置记录下来，而所截取试样的宏观剖面应经过抛光、腐蚀处理后再进行相应的金相检查，最后通过放大适当倍数对该样品进行观测，确认待测区域的显微组织是否满足试验的有关要求。

宏观剖面检查的目的是为了判断裂纹尖端的位置。

1）对于贯穿厚度缺口试样，判断在中心75%厚度范围之内试样的疲劳裂纹尖端是否位于待测区域。

2）对于表面缺口试样，要求疲劳裂纹尖端距离待测区域不能超过0.5mm。

如果在待测区域内指定的显微组织不存在，或因其数量不足而难以确保试验结果的可靠性，或疲劳裂纹尖端位置无法满足标准（深缺口试样）的相应规定，则该焊接试板将因为不满足制备SM试样的标准要求而不能用于断裂韧度试验。在这种情况下，可重新选择待测区域或者重新焊接符合标准要求的试板。如果使用单边缺口弯曲类型的SM试样，并且其显微组织数量达到试验要求，但裂纹尖端位置却不满足相关标准（深缺口试样）的规定，经相关方协商，则允许使用浅缺口试样方法进行断裂韧度试验。

**5. 机加工**

（1）试样尺寸公差　为了保证试样缺口位置的正确性，首先在产品试板上切取试样样坯。试样样坯应机加工到满足尺寸公差要求后再开缺口。弯曲试样的尺寸及所允许的尺寸公差如图9-42所示。

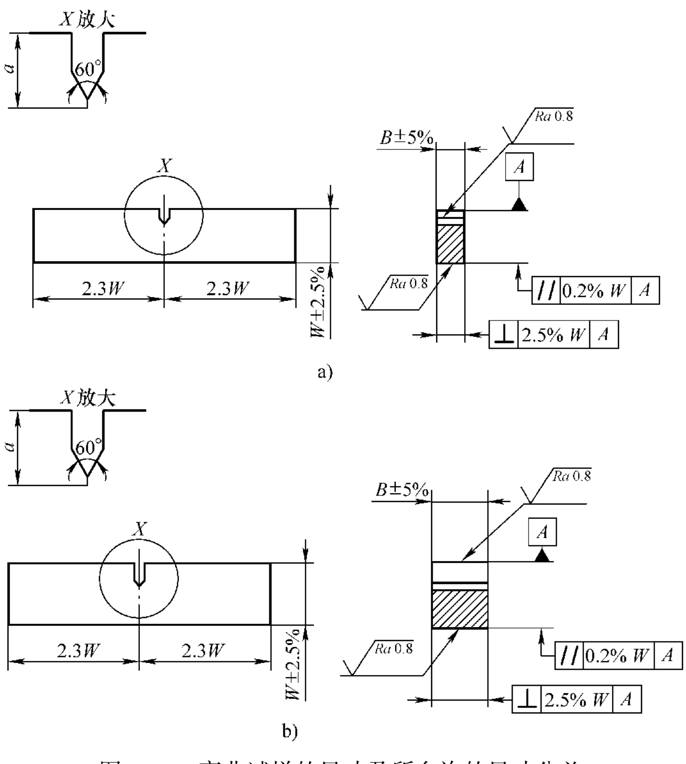



图9-42　弯曲试样的尺寸及所允许的尺寸公差

a）长方形截面试样　b）正方形截面试样

注：1. 对于长方形截面试样，宽度 = $W$，厚度 = $B$ = 0.5$W$，裂纹长度 $a$ = (0.45 ~ 0.7)$W$，力跨距 = 4$W$，缺口宽度 = 0.065$W_{max}$。

2. 对于正方形截面试样，宽度 = $W$，厚度 = $B$ = $W$，裂纹长度 $a$ = (0.45 ~ 0.7)$W$，力跨距 = 4$W$，缺口宽度 = 0.065$W_{max}$。

对于存在焊接错边、焊接变形和样坯弯曲（当试样的样坯取自管件时）的试样，应按照图 9-43 的相应要求进行机加工。对于半径与焊缝厚度比值不小于 10 的管件，由于管道弯曲而允许样坯侧面存在 2. 5% *W* 的平直度公差。对于不平直试样，如果不能达到规定的平直度和对正要求时，可采用局部弯曲的方法在加工缺口前予以矫直。注意矫直时加载点或支撑点至焊缝缺口部位之间的距离应不小于厚度 *B*。变形或弯曲样坯的矫直方法如图 9-44 所示。

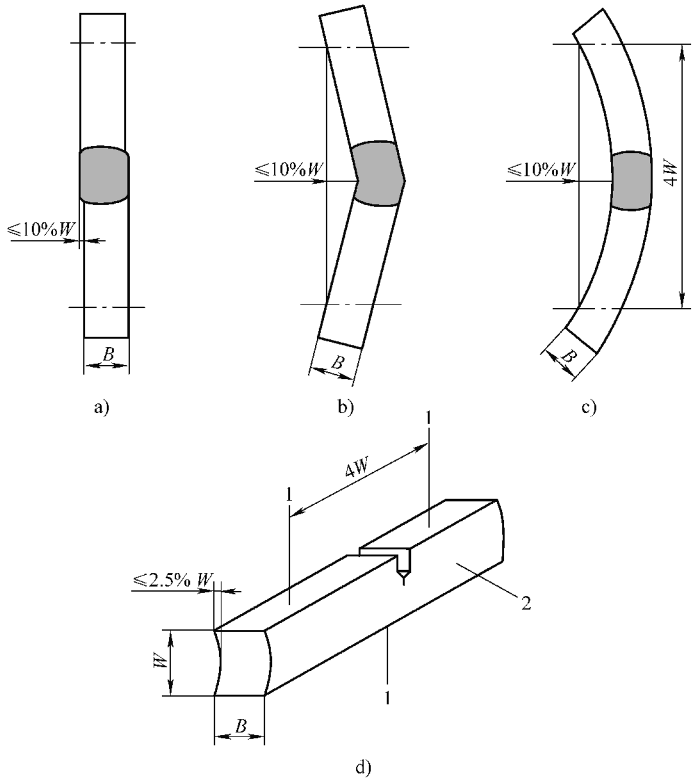



图 9-43　弯曲试样所允许的几何公差

a）错边　b）角变形　c）曲面Ⅰ型　d）曲面Ⅱ型

1—加载点　2—弧面　*W*—1/4 跨距

当取自管材的样坯无法矫直时，可从管材上取下一方形块并与一个适当长度的延伸板焊接在一起。该方形块与延伸板组成一个具有足够长度的试样来满足图 9-43 的曲率要求。方形块与延伸板的焊接位置应远离原焊缝，以便不影响待测区域的显微组织。

焊缝余高部分应加工到与试件母材原始表面具有相同高度的位置。当焊缝两侧材料厚度相差 10% 或更多时，则应按厚度较薄一侧尺寸来加工试样，并应在报告中说明试样原始厚度与机加工后厚度的相应情况。

（2）贯穿厚度试样缺口位置的确定　NP 裂纹面方向的贯穿厚度试样缺口位置的确定如图 9-45 所示。在试样待加工缺口表面（面 A）及相对的另一表面上（面 B）均需

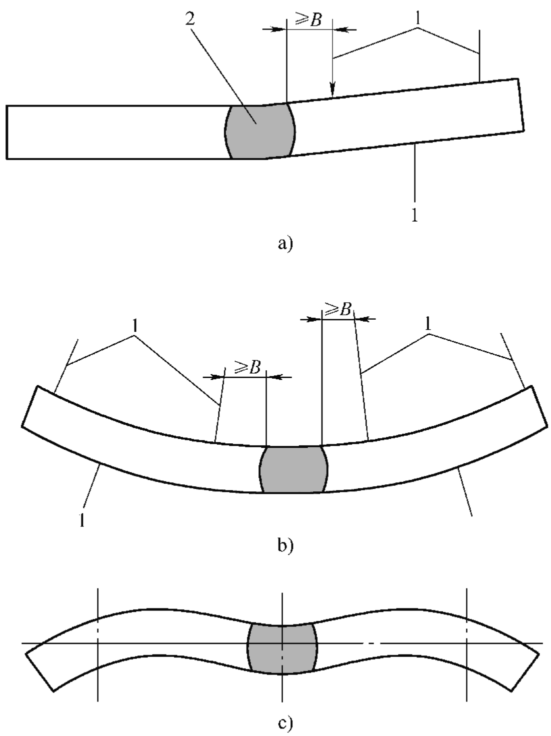



图 9-44　变形或弯曲毛坯试样的矫直方法

a）减少角变形　b）降低管件的曲率（试件两侧分别加载）　c）呈现“羽翼”形状的管截面试样

1—矫直加载点　2—焊缝

进行研磨处理，并腐蚀显现出焊缝和热影响区轮廓位置。然后沿着特定显微组织区域在面 A 和面 B 各画出一条参考标识线。两条标识线延伸到面 A 和面 B 的同一垂直侧面上。在两条延伸线中间等间距的位置画一条新的标识线，用来最终确定 A 面的缺口加工位置。

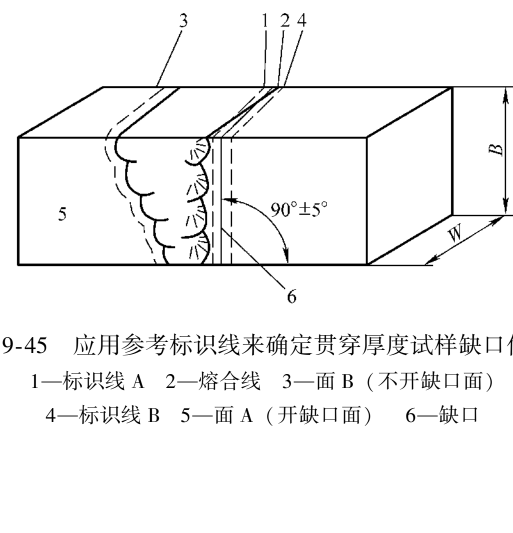



图 9-45　应用参考标识线来确定贯穿厚度试样缺口位置

1—标识线 A　2—熔合线　3—面 B（不开缺口面）

4—标识线 B　5—面 A（开缺口面）　6—缺口

（3）表面缺口试样缺口位置的确定　表面缺口试样缺口位置的确定如图 9-46 所示。首先将试样的两个侧面在进行磨削加工之后腐蚀出焊缝和热影响区。在两个侧面上分别从特定显微组织区域画标识线至缺口加工面，两条标识线的横向中间位置进行机械缺口加工。

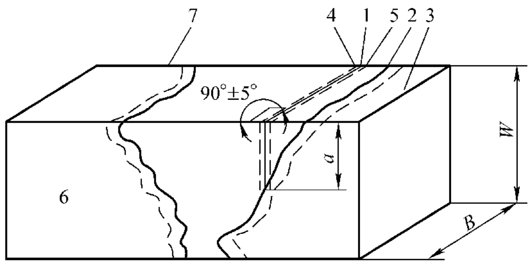



图 9-46　表面缺口试样缺口位置的确定

1—缺口　2—熔合线　3—开缺口面　4—标识线　5—标识线 A　6—面 A　7—面 B

**6. 试样制备**

疲劳裂纹预制的一般要求与 GB/T 21143 完全相同。对于焊缝（中心）金属试样，预制疲劳裂纹的最大力 $F_f$ 以及最大疲劳应力强度因子 $K_f$ 应根据焊缝金属的拉伸性能进行估算，即根据疲劳裂纹所在部位材质的相应力学性能进行估算。而在其他任何情况下，所预制疲劳裂纹的最大力应当使用焊接接头各区域最低的拉伸性能进行估算。

所有焊后热处理或消除应力热处理都应当在预制疲劳裂纹之前进行。

## 9.5.2　试验设备

试验设备应符合 GB/T 21143 的规定。

## 9.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

断裂韧度试验流程如图 9-47 所示。

**2. 试验后金相检查**

（1）概述　对于 SM 试样，为了辨别疲劳裂纹尖端位置是否落在指定的显微组织区域之内，在试验之后应再次进行金相检查。方法是从试样上截取含有断裂面的切片，当检查热影响区试样时，应在焊缝一侧切下含有热影响区的切片。截取切片后，应根据有关规定进行分析，确认疲劳裂纹尖端位置的显微组织。WP 试样试验后不要求进行切片金相检查。在脆性断裂情况下，如果已证实疲劳裂纹尖端落入特定显微组织区域之内，但这并不能保证解理裂纹一定启裂于该显微组织。为确认裂纹萌生部位的显微组织，（如有要求）或许有必要进行更进一步的切片与金相检查，以验证该组织就是脆性裂纹启裂部位。切片的切取方法、金相检查方法与 pop-in 的评定过程中所采用的方法类似。

（2）贯穿厚度缺口试样　按下列方法进行：

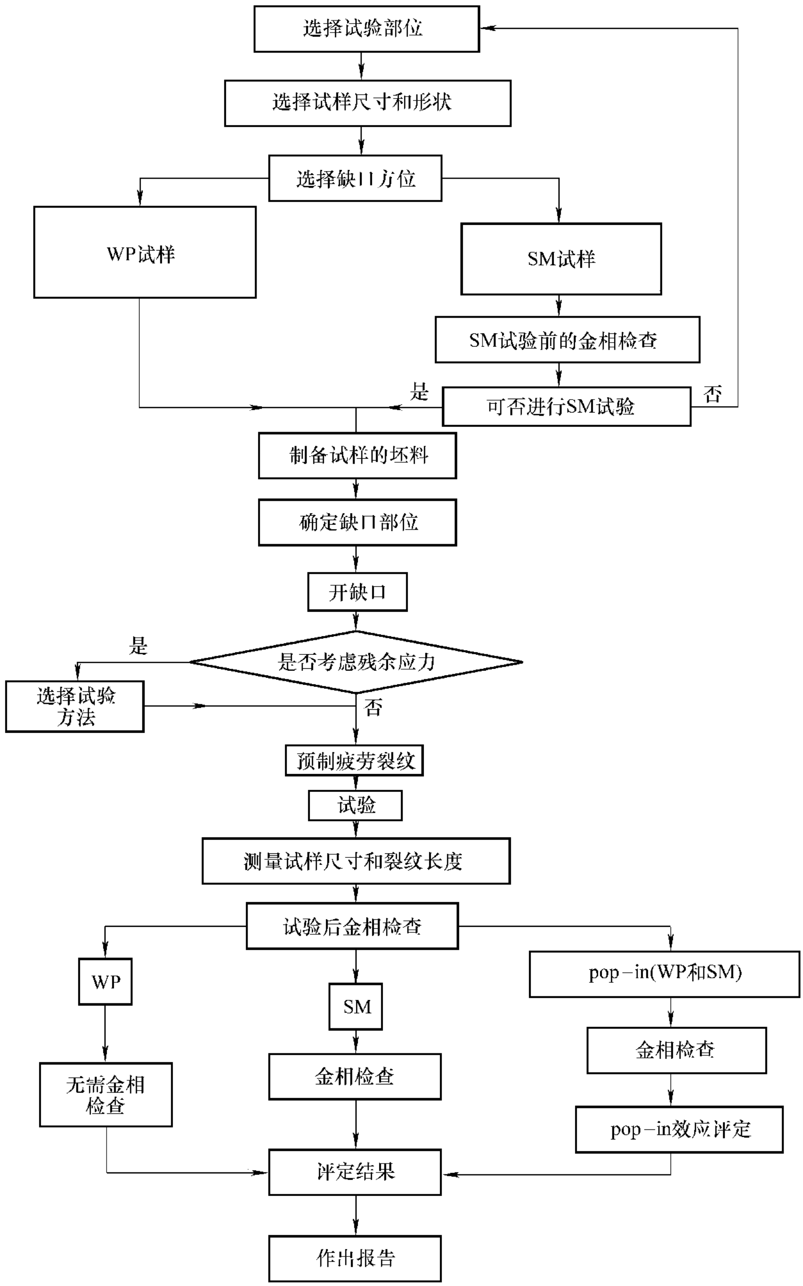



图 9-47　断裂韧度试验流程

1）对于贯穿厚度缺口试样，切片应垂直断裂表面切割，截取位置距疲劳裂纹尖端的最大长度为 2mm，并保证在试样厚度中心 75% 范围含有疲劳裂纹（$B$ 为试样厚度，对于侧开槽试样则为 $B_N$），如图 9-48 所示。然后，对切片进行金相检查，以确定疲劳裂纹尖端是否位于特定显微组织范围之内。

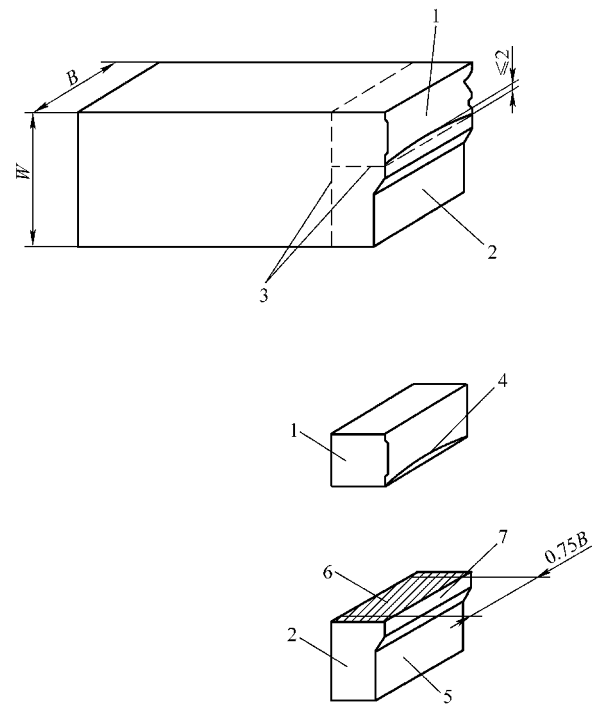



图 9-48　贯穿厚度缺口试样试验后金相检查切片的切取法

1—切片 B　2—切片 A　3—切口　4—疲劳裂纹尖端　5—机械缺口

6—待检测表面（抛光和腐蚀）　7—疲劳预制裂纹

2）切片金相检查是为了判断在试样厚度中心 75%（$B$ 或者 $B_N$）范围内，疲劳裂纹尖端部位是否为特定显微组织，并记录在试样厚度中心 75% 范围内特定显微组织区域的长度及其相应位置。

3）对于 HAZ（热影响区）SM 试样，试验前要进行宏观腐蚀和金相检查。图 9-49 和图 9-50 给出了紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 显微组织数量的计算方法。图 9-50 显示了如何在试样厚度中心 75% 范围内的宏观金相切面（见图 9-49）上绘制确定的特定显微组织分布图。在图 9-50 中沿着理想缺口线分布的各个 SM 特定显微组织块，其长度通常用 $\lambda$ 比表示。在试样厚度中心 75% 范围内，长度 $\lambda$ 的百分比之和（$\sum\lambda$）即为 SM 试样特定显微组织的百分数。

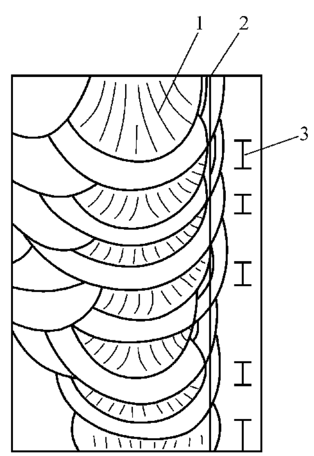



图 9-49　在宏观金相切面上紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 理想缺口线

1—柱状焊缝金属　2—理想缺口线

3—柱状焊缝金属对应的热影响区

对于 SM 试件，当要求特定显微组织应出现在疲劳裂纹尖端附近时，按照图 9-50 所示的方法绘制显微组织分布图，并进行显微组织百分数统计。

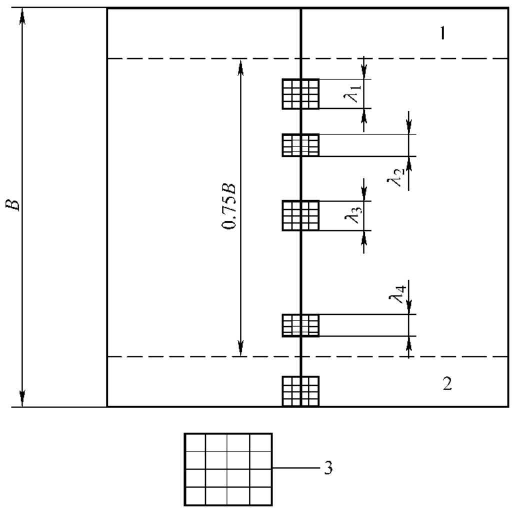



图 9-50　紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 显微组织分布图

1—顶部　2—根部　3—指定的热影响区

注：指定的微观组织（在厚度的中心 75% 部位）$=\dfrac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n}\lambda}{0.75B}\times 100$。

（3）表面缺口试样　按下列方法进行：

1）如果试样发生解理断裂，那么需要采用适当的放大倍数对断裂面进行检查，以确定裂纹萌生的确切位置。应至少在靠近断裂裂纹萌生部位制取一个切片，切片平面应垂直于缺口表面与裂纹平面（见图 9-51）。当仅发生裂纹稳定扩展时，切片应在疲劳裂纹尖端最深处截取。裂纹萌生位置的确定需要目测，有时也会借助于光学显微镜或扫描电镜进行观察确认。

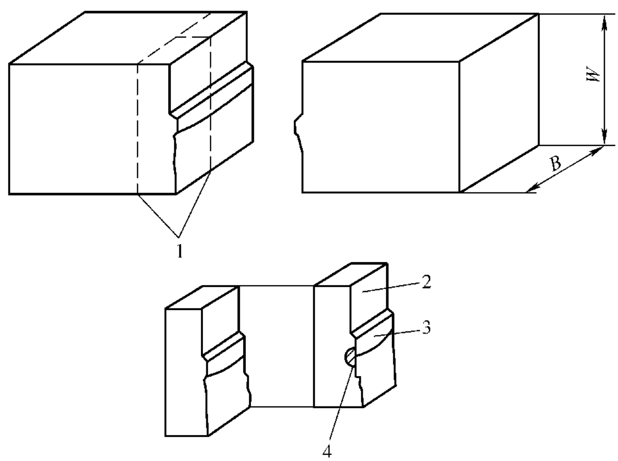



图 9-51　表面缺口试样试验后金相检查切片的切取方法

1—切口　2—机械缺口　3—疲劳预制裂纹　4—待检测表面（抛光和腐蚀）

2）切片金相检查用以确认疲劳裂纹尖端是否位于特定显微组织区域内。当特定显微组织区位于疲劳裂纹尖端前面时，这两者之间最小距离用 $s_1$（$s_1$ 的测量准确度至少为 ±0.05mm，见图 9-52a）表示。当特定显微组织区位于疲劳裂纹尖端的一侧时，两者之间最小距离用 $s_2$（$s_2$ 的测量准确度也至少为 ±0.05mm，见图 9-52b）表示。为了确定这些距离可能需要在断裂表面两侧截取切片。

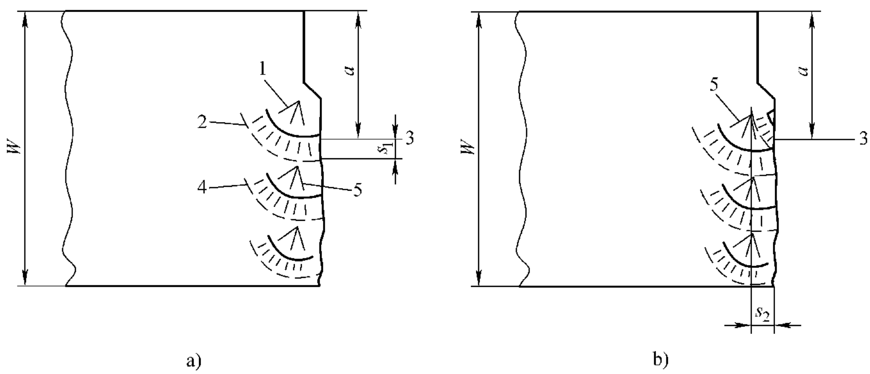



图 9-52　SM 表面缺口试样 $s_1$ 和 $s_2$ 的测量

a）待测区域微观组织位于疲劳裂纹尖端前沿　b）待测区域微观组织位于疲劳裂纹尖端一侧

1—焊珠　2—再热焊缝金属　3—疲劳裂纹尖端　4—再热焊缝金属　5—SM 试样（待测区域微观组织）

（4）pop-in 效应评定　当力下降和位移增加均不足 1% 时，该 pop-in 应忽略不计。

**3. 断裂韧度的表示**

按 GB/T 21143 的规定进行断裂韧度的计算。

# 9.6　硬质合金横向断裂强度试验

硬质合金横向断裂强度试验按照 GB/T 3851—1983《硬质合金横向断裂强度测定方法》进行。

## 9.6.1　试样

1）试样应具有矩形横截面，其尺寸如表 9-7 所示。

**表 9-7　试样的尺寸**　（单位：mm）

| 类　型 | 长　度 | 宽　度 | 高　度 |
|---|---|---|---|
| A | 35 ±1 | 5 ±0.25 | 5 ±0.25 |
| B | 20 ±1 | 6.5 ±0.25 | 5.25 ±0.25 |

注：一般来说，如果两种类型试样的表面状态相同，B 型试样的强度比 A 型试样约高 10%。这两种类型的试样具有类似的重现性。

2）试样的四个长面用金刚石砂轮（最好用树脂粘结）在足够的切削液作用下进行加工。每次磨削量不得超过 0.01mm，且全部磨痕应与长度方向平行。每个表面的磨去

厚度不应少于0.1mm，表面粗糙度 $Ra$ 不大于0.4μm。四个长棱应磨出0.15～0.2mm的倒角，全部磨痕也应与长度方向平行。也可采用烧结状态的试样，为了避免毛刺，这种试样在烧结前应倒棱0.4～0.5mm，倒角为45°。

3）四个长面每两个相对面的平行度误差为：烧结状态试样，每10mm误差不大于0.05mm；加工试样，每10mm误差不大于0.01mm。

4）计算结果用的宽度与高度的测量，应在试样的中部进行，测量精确到0.01mm。

5）试样不得有明显的表面裂纹和组织缺陷。

### 9.6.2　试验设备

1）试验设备应具有可以施加一个均匀增加力的装置，其精度应是1%或更好。

2）试验用的夹具应有两个自由平放的支承圆棒（辊），两圆棒之间有固定的距离，还有一个自由平放的加力圆棒（辊），三个圆棒的直径相等，其值可为3.2～6mm，或者可用一个直径为10mm的圆球加力。支承圆棒和加力圆棒（球）必须用碳化钨硬质合金制作，该材质不因加力而产生显著塑性变形，其表面粗糙度 $Ra$ 不大于0.63μm。

3）支承圆棒应平行地固定，其跨度对于A型试样为30mm±0.5mm，B型试样为14.5mm±0.5mm。测量跨度时，对于B型试样应准确到0.1mm，而对A型试样应准确到0.2mm。

4）固定圆棒应使其平行度误差减少到最小。

5）夹具应采用合适的防护罩。

### 9.6.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）将试样对中地平放在支持圆棒上，使试样的长度方向与支承圆棒的轴向垂直。B型试样，要将宽面放置在支承圆棒上。

2）将加力圆棒（或球）缓慢地与试样相接触。加力的作用线（或点）与试样跨度中点的偏差，对A型试样不得超过0.5mm，B型试样不得超过0.2mm。

3）以不超过200MPa/s的均匀速度对试样增加应力。

**2. 结果表示**

横向断裂强度按下式计算：

$$R_{\mathrm{tr}}=\frac{3kFl}{2bh^2}$$

式中　$R_{\mathrm{tr}}$——横向断裂强度，单位为MPa；

$F$——断裂试验所需要的力，单位为N；

$b$——与试样高度垂直的宽度，单位为mm；

$h$——与施加的作用力平行的试样高度，单位为mm；

$l$——两支承点间的距离，单位为mm；

$k$——补偿倒棱的修正系数，如表9-8所示。

表 9-8　倒棱的修正系数 $k$ 值

| 试 样 类 型 | 倒棱/mm | 修正系数 $k$ |
|---|---|---|
| A | 0.4～0.5 | 1.03 |
| A | 0.15～0.2 | 1.00 |
| B | 0.4～0.5 | 1.02 |
| B | 0.15～0.2 | 1.00 |

## 9.7　烧结金属材料横向断裂强度试验

烧结金属材料横向断裂强度试验按照 GB/T 5319—2002《烧结金属材料（不包括硬质合金）横向断裂强度的测定》进行。

### 9.7.1　试样

1）由内腔名义尺寸为 30mm×12mm 的凹模压制成厚度为 6mm 的试样。试样在整个长度范围内应保持厚度均匀，其偏差不大于 0.1mm，宽度上的偏差不大于 0.04mm。

2）可采用机加工试样，加工时要保证不在试样上造成应力集中源。试样在与压制方向垂直的平面上切取 30mm×12mm，由于考虑到可能存在各向异性，切割试样时应选取密度均匀的部分。此外，采用的机加工技术不应使试样产生显著性结构变化（例如，软材料剪切时产生致密化或电腐蚀加工技术产生微观结构的变化）。如果出现了这些变化，建议磨削掉发生变化的表层。

### 9.7.2　试验设备

**1. 试验机**

能够满足静态加载条件和精度为 ±1% 的任何型号的试验机。

**2. 试验夹具**

由两个间距固定的支撑圆柱体（辊子）和一个加载圆柱体（辊子）组成。三个圆柱体的直径为 3.2mm ±0.1mm。由硬度不低于 700HV 的淬火钢或硬质合金制成。圆柱体应平行安装，两个支撑圆柱体的中心距为 25.0mm ±0.2mm 或 25.4mm ±0.2mm，测量精度为 ±0.1mm。加载圆柱体安装在两个支撑圆柱体的中间位置。安装圆柱体时应考虑到试样顶面和底面平行度公差。典型的试验夹具示意图如图 9-53 所示。试验夹具的周围应有安全保护措施。

**3. 尺寸测量仪器**

千分尺或其他合适的测量仪器，精度为 ±0.01mm。

### 9.7.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）在试样中心处测量宽度和厚度，精确到 0.01mm。

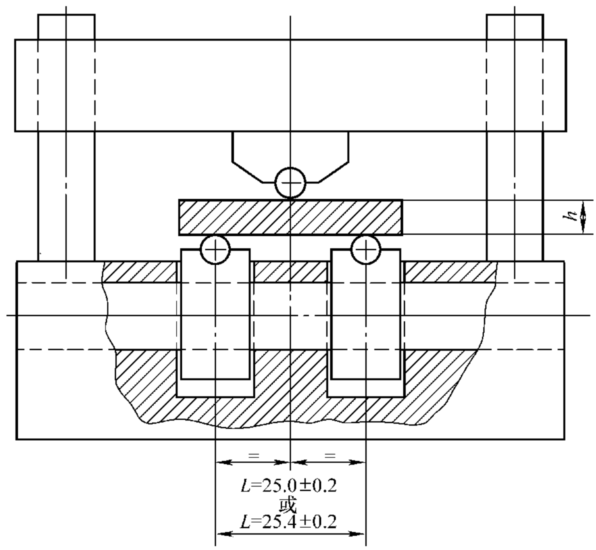



图 9-53　试验夹具示意图

2）将试样 30mm×12mm 的任一面对称地放在支撑圆柱体上，使试样的纵轴与支撑圆柱体的纵轴成 90°±30′的角度。在两支撑圆柱体的中间位置缓慢而平稳地施加载荷，使试样在不少于 10s 的时间内断裂，记录由于第一个裂纹出现而使载荷突然下降时的数值。

3）试验在适当数量的试样上进行。通常采取 5 个试样。

**2. 结果表示**

横向断裂强度按下式计算：

$$R_{tr} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

式中　$R_{tr}$——横向断裂强度，单位为 MPa；

$F$——断裂试验所需要的力，单位为 N；

$b$——试样宽度，单位为 mm；

$h$——试样厚度，单位为 mm；

$L$——两支承点间的距离，单位为 mm。

# 第 10 章　材料疲劳性能测定试验

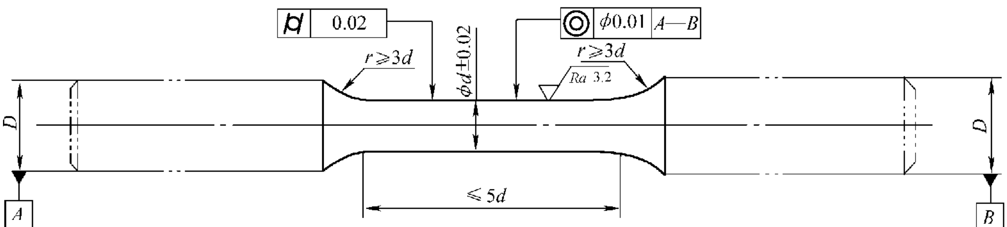
## 10.1　金属材料扭应力疲劳试验

金属材料扭应力疲劳试验按照 GB/T 12443—2007《金属材料　扭应力疲劳试验方法》进行。

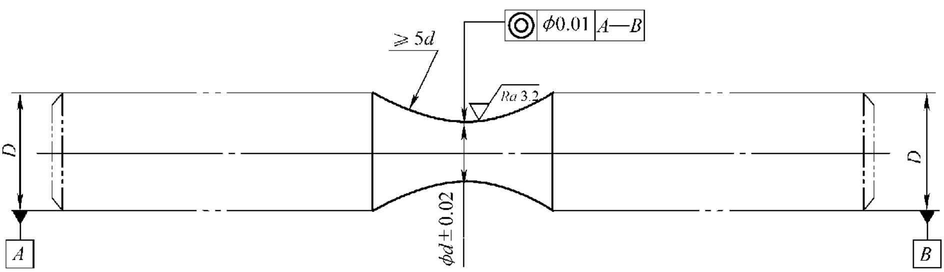
### 10.1.1　试样

**1. 试样形状**

扭应力疲劳试验的试样形状如图 10-1 所示。其工作部分可为圆柱形（见图 10-1a）和漏斗形（见图 10-1b），工作部分横截面均为圆形。夹持端的形状则根据试验机的夹头形状和试验材料设计。试样的典型夹持端如图 10-2 所示。




a)




b)

图 10-1　试样形状

a）圆柱形试样　b）漏斗形试样

*D*—试样夹持端的直径或相对平面间的距离（mm）　*d*—试样工作部分的最小直径（mm）

*r*—*d* 与 *D* 之间的过渡圆弧半径或夹持端间的圆弧半径（mm）

**2. 试样尺寸**

直径 *d* 的范围为 5.0～12.5mm，常用直径尺寸为 6.0mm、7.5mm、9.5mm，允许偏差为 ±0.02mm。

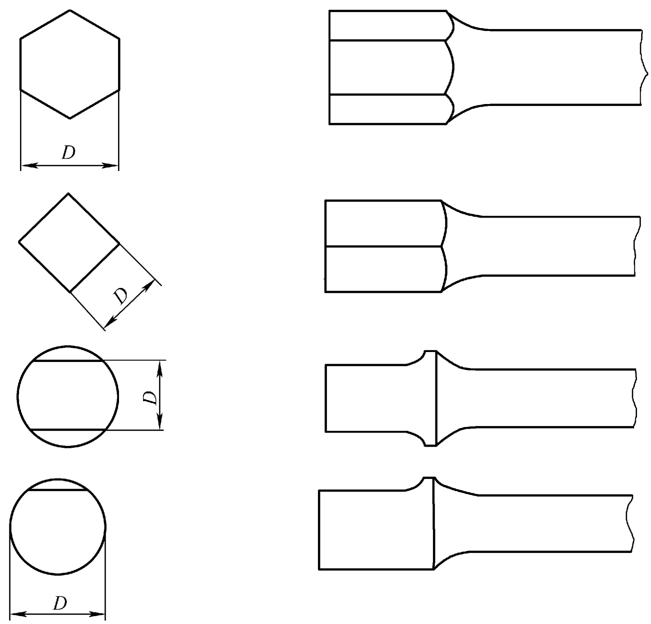



图 10-2　试样典型夹持端

*D*—试样夹持端的直径或相对平面间的距离（mm）

实际最小直径的测量准确度应不低于0.01mm。测量直径 *d* 时，不要损伤试样表面。工作部分与夹持部分的同轴度误差应不大于0.01mm。同批试验或对比试验所用的试样直径 *d* 应具有相同的公称值。

**3. 制备**

1）制备试样时所采用的机加工方法不允许改变试样的冶金组织和力学性能，且引起的试样表面加工硬化应尽可能小。磨削精加工较硬材料的试样时，应提供足够的切削液，确保试样表面不过热。

2）工作部分与过渡圆弧的连接应圆滑，不应出现加工痕迹。粗加工后的试样毛坯如需热处理，应留有适当的加工余量，以保证精加工后能够消除热处理对试样表面的不良影响。

3）不允许对试样进行矫直。

**4. 表面抛光**

试样的工作部分经车削或磨削至公称尺寸后，采用粒度较细且逐次变细的水磨砂纸或砂布，沿其圆周方向进行手工或机械抛光。抛光的中间阶段可沿任一方向，以消除较粗粒度的砂纸或砂布所产生的伤痕，抛光的最后阶段必须沿圆周方向。抛光后，试样工作部分的表面粗糙度 *Ra* 的最大允许值为0.32μm。

## 10.1.2　试验设备

1）用适当方法校准的平均扭矩和扭矩范围的示值误差均不超过 ±3%，或均不超

过试验机使用满量程的 ±0.5%，取其大值。

2）试验过程中，两夹头应保持同轴，且夹头与试样不得有相对滑移。

3）试验时应有工作可靠的扭矩控制装置、计数装置和试样失效或至指定循环时的停机装置。

4）频率范围宽，并能分级可调或连续可调。

## 10.1.3　试验内容及结果表示

**1. 试验条件**

1）试验环境为室温 10～35℃。

2）应力循环频率不应引起试样过热和试验机共振。

3）装于试验机上的试样不允许承受所需规定扭应力以外的其他应力。

**2. 试验原理**

公称直径相同的试样装于扭转疲劳试验机上，并承受图 10-3 中 4～7 所示任一循环类型扭应力所对应的扭矩，连续试验至试样失效（指试样完全断裂或出现肉眼可见的疲劳裂纹）或至指定循环次数。

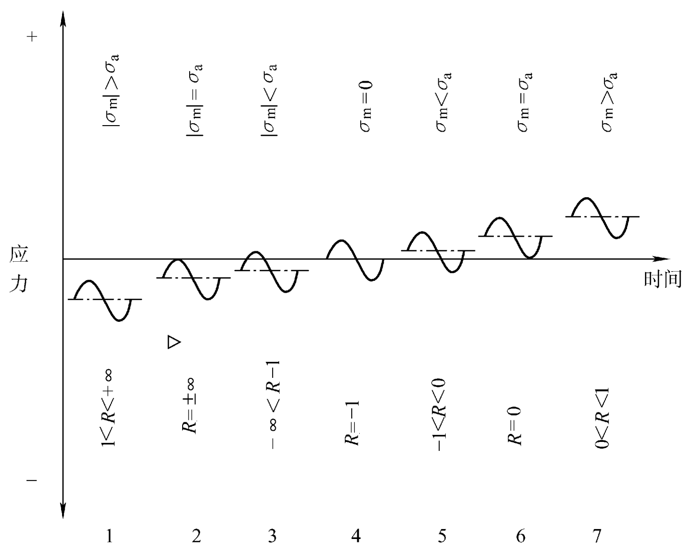



图 10-3　循环应力的类型

$\sigma_m$—平均应力　$\sigma_a$—在应力循环中最大应力和最小应力之间代数差的一半

$R$——个循环内力或应力最小值与最大值的比率

**3. 试验步骤**

（1）安装试样　将试样紧固在试验机上，使试样与试验机两夹头保持良好的同轴度。

（2）选定应力循环频率　根据所用的试验机型号、试样、应力大小或试验要求选定应力循环频率。

（3）施加扭矩　开动试验机，其应力循环频率调至选定值之后，将规定扭应力所需的相应扭矩施加到试样上。

**4. 扭转疲劳性能的测定**

1）试验一般在预计（0.95～1.05）$\tau_D$（扭转疲劳极限，是在指定循环基数下的中值扭转疲劳强度，循环基数一般取 $10^7$ 或更高些）范围的 3 级左右等间距应力水平下进行，应力增量一般为预计 $\tau_D$ 的 3%～5%。第一根试样的应力水平应略高于预计 $\tau_D$，在每级应力水平下试验的试样数量一般在为两根以上。

2）试验顺序如图 10-4 所示。

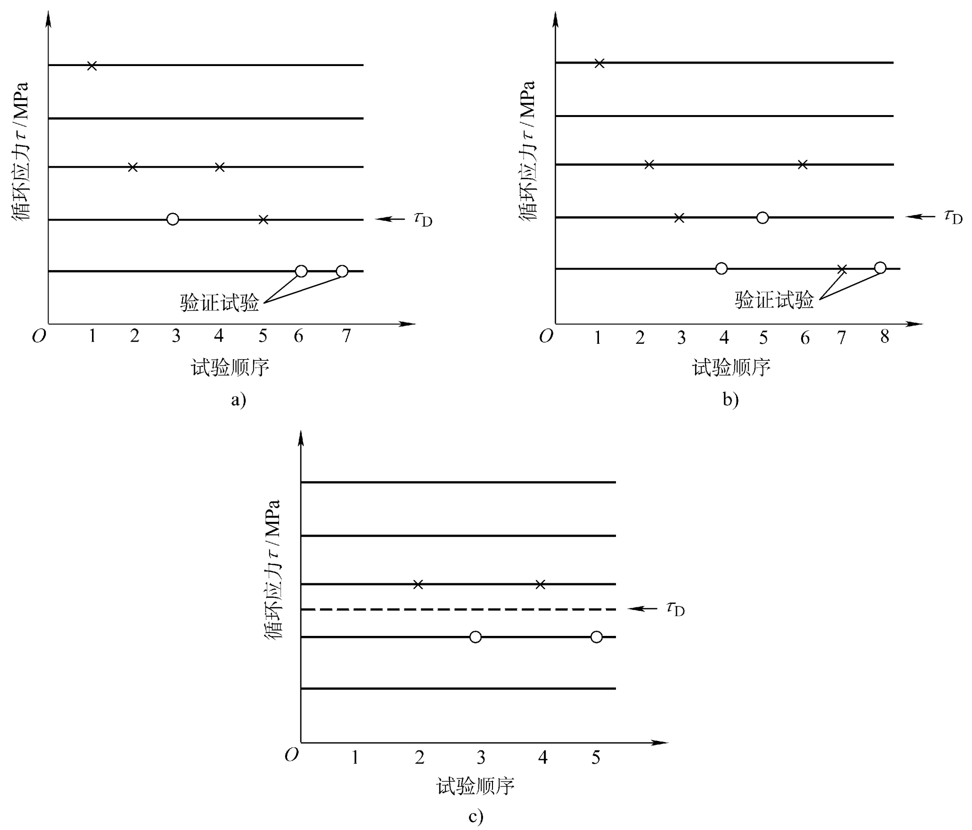



图 10-4　测定 $\tau_D$ 的试验顺序

a）第一类试验顺序　b）第二类试验顺序　c）第三类试验顺序

×—失效　○—未失效

如果半数试样试验至指定循环数而不失效的最高应力水平，但在比此应力水平低一级的应力水平下，试验至指定循环数而不失效的试样必须超过半数，如图 10-4a 和图 10-4b 所示，则此时所得应力水平即为扭转疲劳极限。

如果在某级应力水平下，超过半数的试样试验未至指定循环数已失效，而在比此应力水平低一级的应力水平下，试样试验至指定循环数全不失效时，则上述两级应力水平

的平均值为扭转疲劳极限，如图 10-4c 所示。

**5. 试验结果的处理**

（1）列表法　表中应包括如下内容：

1）试验顺序。

2）试样号。

3）试样形状和尺寸及表面粗糙度。

4）试验中的频率、应力、循环次数。

5）中等寿命区的平均寿命和长寿命区的扭转疲劳极限。

（2）图示法　应力-疲劳寿命曲线（*S-N* 曲线）是常用的一种表示疲劳试验结果的方法，绘制 *S-N* 曲线时，以应力为纵坐标，以疲劳寿命为横坐标。疲劳寿命采用对数坐标，应力采用线性坐标或对数坐标。用逐点描迹法或最小二乘法，拟合上述试验数据点即成 *S-N* 曲线。

## 10.2　金属材料滚动接触疲劳试验

金属材料滚动接触疲劳试验按照 YB/T 5345—2006《金属材料滚动接触疲劳试验方法》进行。

### 10.2.1　试样

**1. 选材**

试验材料要进行检验，必须符合有关标准要求。不同工艺的对比试验，应采用同一炉号、同一批次、同一规格的材料；不同材料的对比试验，应采用同一规格或接近相应规格的材料。陪试件的材料及技术要求应与试样材料相同。

**2. 试样、陪试件形状与尺寸**

常用的试样和陪试件的形状和尺寸如表 10-1 和图 10-5 ~ 图 10-10 所示，可根据试验目的和试验机类型进行选用。一般情况下，JP-1 号和 JP-2 号试样用于点接触的试验，JP-4 号试样用于线接触的试验。

表 10-1　试样和陪试件的选用

| 试　样 | | 陪 试 件 | | 适用试验机型号 |
|---|---|---|---|---|
| 试 样 号 | 接触方式 | 陪试件号 | 形　状 | |
| JP-1、JP-2、JP-3 | 点接触 | PS-1 | 圆柱形 | JPM-1 |
| JP-4 | 线接触 | PS-2 | 圆盘形 | JP-BD 1500 |

**3. 机加工**

机加工试样和陪试件的工序一般是粗车、精车、毛坯热处理（根据不同材料及要求而定）、粗磨和精磨。

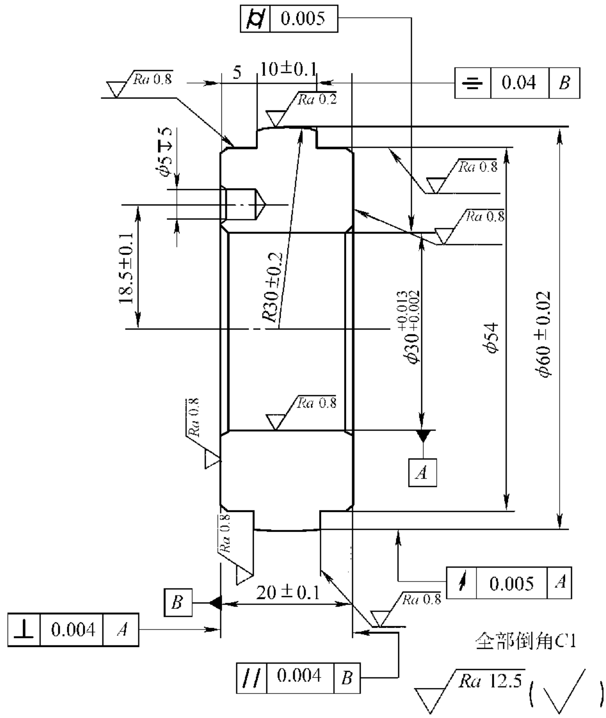



图 10-5　JP-1 试样

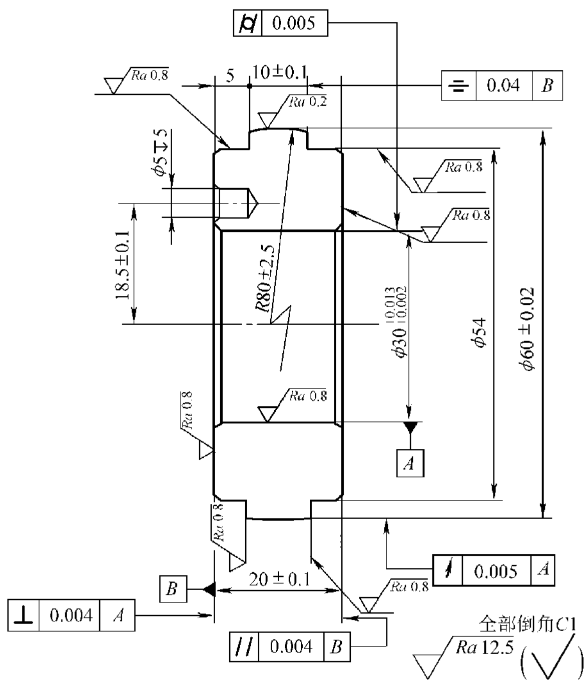



图 10-6　JP-2 试样

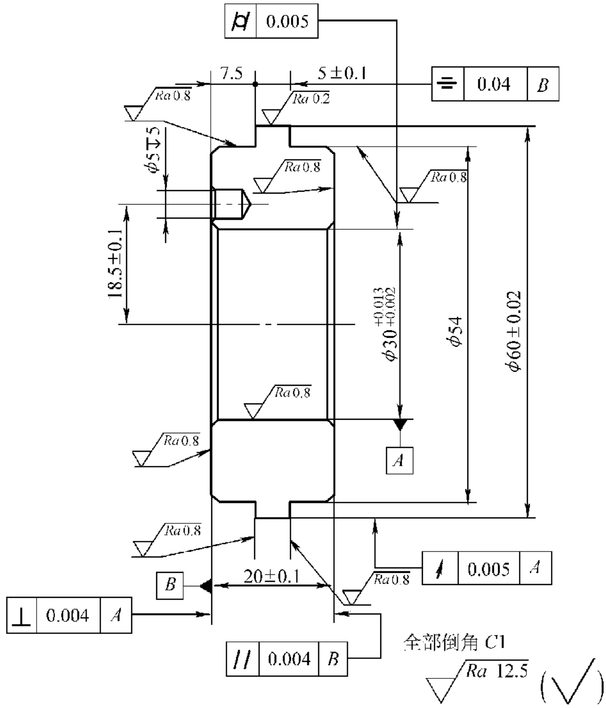



图 10-7　JP-3 试样

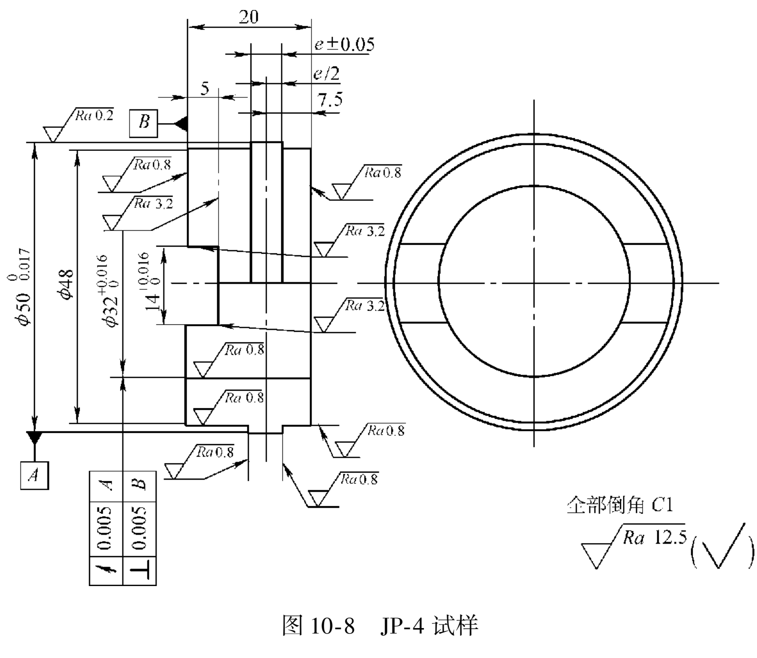



图 10-8　JP-4 试样

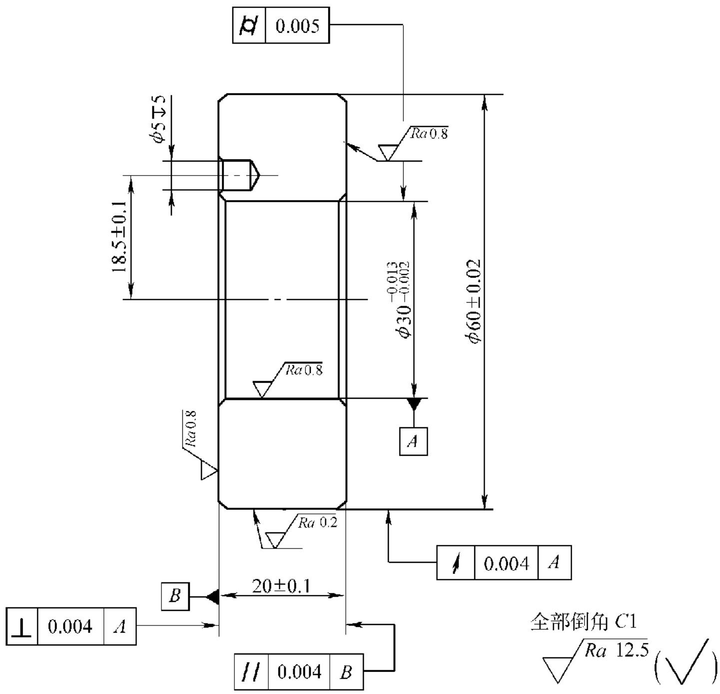



图 10-9　PS-1 试样

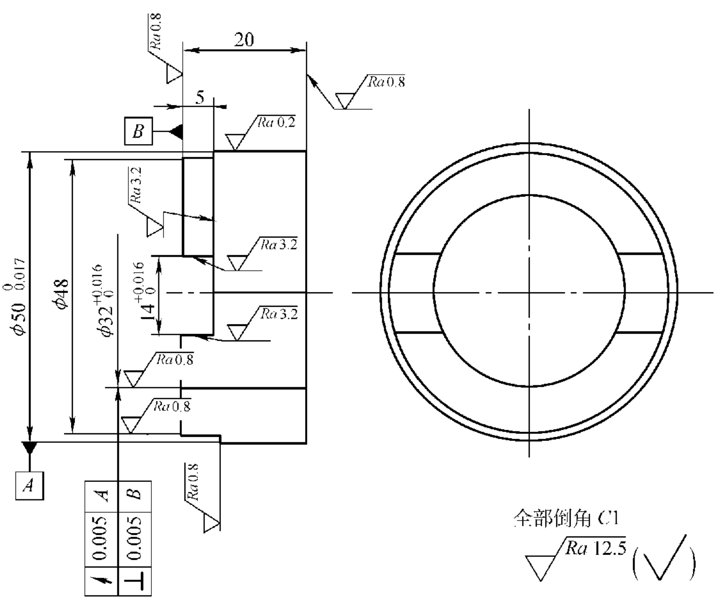



图 10-10　PS-2 试样

**4. 热处理**

硬度不小于 40HRC 情况下，同一批试样、陪试件的硬度差应不大于 2HRC，同一试

样、陪试件本身的硬度差应不大于 1.5HRC，组与组之间的试样、陪试件的硬度差可根据试验目的确定。

### 10.2.2　试验设备

1）试验机应安装在无冲击、无强烈振动、无腐蚀的干燥试验室内。

2）试样、陪试件轴线在铅垂平面内，平行度误差应不大于 0.02mm。

3）试样、陪试件轴线在水平平面内，平行度误差应不大于 0.02mm。

4）主轴在安装试样和陪试件位置处的径向圆跳动量应不大于 0.01mm，端面圆跳动量应不大于 0.01mm。

5）静态载荷误差应不大于 ±1%。

6）试验机应配备自动停机装置，试样发生疲劳失效时能及时自动报警停机，无误停和滞停现象，试样疲劳点的检测灵敏度可调。

7）试验机的轴承、齿轮和试样，应采用符合 GB 443—1989《L-AN 全损耗系统用油》规定的 L-AN22。

8）试验过程中试样润滑出口油温不应超过 55℃，其偏差应在 ±4℃ 以内。

9）润滑油应定期抽样进行黏度、机械杂质和水分检查，不符合技术条件要求者不应继续使用。应严防灰尘及金属杂质和水分进入润滑油及润滑系统。试验机连续工作，每半年至少换油一次；间断工作，每年至少换油一次。

### 10.2.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

（1）试样的安装　试样和陪试件在安装之前，用煤油将其清洗干净。试样装于上主轴，陪试件装于下主轴。试样与陪试样接触后，在摇摆头的压力下测试样径向圆跳动量应不大于 0.03mm。

（2）试验要点　如试验机的载荷系统为砝码杠杆载荷系统，须把加力一级杠杆调到水平。试样加预载荷后开机，然后施加主载荷。不允许带主载荷开机、停机（自动停机除外）。试验过程中应保持载荷恒定，无特殊情况下不得中途停试。

**2. 疲劳失效的判断**

1）深层剥落面积不小于 $3mm^2$。

2）在 $10mm^2$ 面积内出现麻点率达 15% 的损伤。

**3. 试验无效的判断**

1）载荷吊杆刀口脱出，杠杆比发生变化，载荷不准。

2）陪试样和陪试件互相装错位置。

3）振动加剧，试样表面局部有压痕或凹坑。

4）陪试件疲劳剥落，损伤了试件表面。

5）润滑不足，试件表面烧伤。

6）由于主轴轴承疲劳或主轴变形，发生强烈振动。

7）试样和陪试件松动、滑移。

8）控制仪器失灵，试样剥落长度大于5mm。

**4. *N* 次循环的中值接触疲劳强度的测定**

第一个试样的应力水平应选择略高于预计的中值接触疲劳强度，试验一般在3～5级等间距应力水平下进行，应力增量一般约取预计的中值接触疲劳强度的3%～5%。每级应力水平下一般试验两个以上的试样。试验顺序如图10-11～图10-13所示。

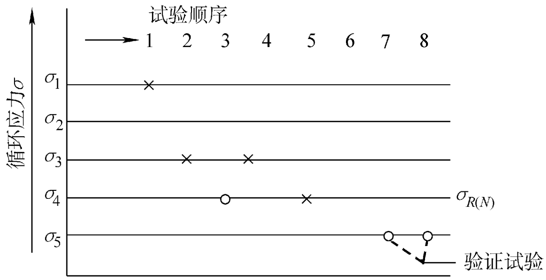



图10-11　第一种情况的试验顺序

×—失效　○—未失效

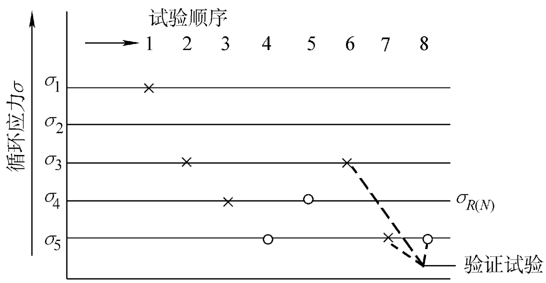



图10-12　第二种情况的试验顺序

×—失效　○—未失效

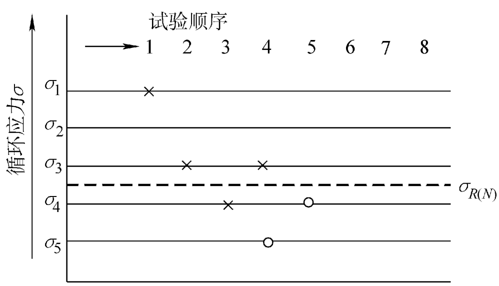



图10-13　第三种情况的试验顺序

×—失效　○—未失效

1）取半数试样试验至指定循环数 $N$ 而不失效的最高应力水平，或在比此应力水平低一级的应力水平下，试验至 $N$ 次循环而不失效的试样必须超过半数，如图10-11和图10-12所示。用这种方法处理试验结果所得应力水平，即为 $N$ 次循环的中值接触疲劳强度 $\sigma_{R(N)}$。

2）如果在某级应力水平下，超过半数的试样试验未达 $N$ 次循环已失效，而在比此应力水平低一级的应力水平下，试样试验至 $N$ 次循环而全部不失效时，则上述两级应力水平的平均值确定为 $N$ 次循环的中值接触疲劳强度 $\sigma_{R(N)}$，如图 11-13 所示。

3）指定循环数 $N$，应根据材料和使用要求确定，一般可取 $N=10^7$ 次。

**5. 试验结果处理**

（1）试验应力的选择　同一应力水平下的对比试验，试验应力应选择近零件实际工作应力范围的上限。对于轴承钢、渗碳钢及其他高强度材料，JP-1 号试样的接触应力选择 5000MPa 左右；JP-2 号试样的接触应力选择 3500MPa 左右；JP-3 号和 JP-4 号试样的接触应力选择 2500MPa 左右。低强度钢和软表面试样的试验应力需根据材料实际强度调试确定。在零件实际工作应力范围内选择 4 ~5 级应力水平，最低试验应力应选择实际工作应力的下限，然后逐级上升确定各试验应力。相邻两级应力的级差根据接触方式确定。点接触的应力级差选择 250 ~400MPa，线接触的应力级差选择 18 ~300MPa。

（2）接触应力的计算　点接触和线接触最大应力分别按下面的公式计算：

$$\sigma_{\max}=\frac{1}{\pi\alpha\beta}\times\sqrt[3]{\frac{3}{2}\times\frac{F(\sum\rho)^2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^2}}$$

$$\sigma_{\max}=\sqrt{\frac{F(\sum\rho)}{\pi L\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}}$$

式中　$\sigma_{\max}$——最大接触应力，单位为 MPa；

$\pi$——常数，取 3. 1416；

$\alpha$、$\beta$——点接触变形系数；

$F$——施加于试样上的载荷，单位为 N；

$\mu_1$——试样的泊松比；

$\mu_2$——陪试件的泊松比；

$E_1$——试样的弹性模量，单位为 MPa；

$E_2$——陪试件的弹性模量，单位为 MPa；

$L$——试样接触长度，单位为 mm；

$\rho$——试样与陪试件接触处的主曲率，单位为 $mm^{-1}$；

$\sum\rho$——试样、陪试件主曲率之和，单位为 $mm^{-1}$，其计算公式为

$$\sum\rho=\rho_{11}+\rho_{12}+\rho_{21}+\rho_{22}=\frac{1}{R_{11}}+\frac{1}{R_{12}}+\frac{1}{R_{21}}+\frac{1}{R_{22}}$$

$R_{11}$——试样垂直于滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$R_{12}$——试样沿滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$R_{21}$——陪试件垂直于滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$R_{22}$——陪试件沿滚动方向的曲率半径，单位为 mm。

（3）接触应力循环次数的计算　试样接触应力循环次数按下式计算：

$$N = nt$$

式中　$N$——接触应力循环次数；

$n$——试样转速，单位为 r/min；

$t$——试验时间，单位为 min。

（4）油膜参数的选择和计算　对于材料因素的对比试验，油膜参数推荐 $\lambda > 1.8$，使试样工作表面处于部分弹流或接近弹流润滑状态。点接触和线接触的油膜参数分别按下面公式计算：

$$\lambda = \frac{h_0}{Ra} = \frac{1}{Ra} \times 2.04\phi^{0.74}(\eta_0 Bv)^{0.74} R^{0.407}\left(\frac{E'}{F}\right)^{0.074}$$

$$\lambda = \frac{h_0}{Ra} = \frac{1}{Ra} \times 2.65\eta_0^{0.7} v^{0.7} B^{0.54} R^{0.43} q^{-0.13} E'^{-0.03}$$

式中　$\lambda$——油膜参数；

$h_0$——最小油膜厚度，单位为 μm；

$Ra$——试样综合表面粗糙度，单位为 μm，其计算公式为

$$Ra = \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}$$

$Ra_1$——试样表面粗糙度，单位为 μm；

$Ra_2$——陪试件表面粗糙度，单位为 μm；

$\phi$——漏泄修正系数，其计算公式为

$$\phi = \left(1 + \frac{2}{3} \times \frac{R_y}{R_z}\right)^{-1}$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}}$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{1y}} + \frac{1}{R_{2y}}$$

$R_x$——试样和陪试件垂直于滚动方向的当量曲率半径，单位为 mm；

$R_y$——试样和陪试件沿滚动方向的当量曲率半径，单位为 mm；

$R_{1x}$——试样垂直于滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$R_{2x}$——陪试件垂直于滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$R_{1y}$——试样沿滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$R_{2y}$——陪试件沿滚动方向的曲率半径，单位为 mm；

$\eta_0$——大气压下润滑油的黏度，单位为 $N \cdot s/mm^2$；

$B$——压力系数，单位为 MPa；

$v$——当量滚动速度，单位为 mm/s，其计算公式为

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$v_1$——试样的滚动速度，单位为 mm/s；

$v_2$——陪试件的滚动速度，单位为 mm/s；

$R$——试样与陪试件的综合曲率半径，单位为 mm；

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_{1x}}+\frac{1}{R_{1y}}+\frac{1}{R_{2x}}+\frac{1}{R_{2y}}$$

$F$——加于试样上的径向载荷，单位为 N；

$E'$——试样和陪试件的综合当量弹性模量，单位为 MPa，其计算公式为

$$\frac{1}{E'}=\frac{1}{2}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)$$

$E_1$——试样弹性模量，单位为 MPa；

$E_2$——陪试件弹性模量，单位为 MPa；

$\mu_1$——试样泊松比；

$\mu_2$——陪试件泊松比；

$q$——单位长度载荷，单位为 N/mm，其计算公式为

$$q=\frac{F}{L}$$

$L$——试样接触长度，单位为 mm；

$F$——施加于试样的径向载荷，单位为 N。

（5）滑差率的选择　试样和陪试件的滑差率主要根据零件工作滑差范围进行选择。对于模拟滚动轴承的试验，选用 5% 的滑差率为宜；对于模拟齿轮的试验，选用 10% ~ 20% 的滑差率为宜。模拟其他零件的试验，可根据零件实际工况确定恒滑差率或变滑差率，一般采用 10% 的滑差率。

（6）转速的选择　试验机主轴的转速应根据试验载荷和试样的滑差率来选择：重载荷大滑差率可选择 1500 ~ 2000r/min；轻载荷小滑差率可选择 2000 ~ 3000r/min。对于单因素的对比试验：如滑差率为 5%，转速可选择 3000r/min；如滑差率为 15% 左右，转速可选择 2000r/min。

（7）子样容量的选择　子样容量的选择如下：

1）筛选试验的子样数量不少于 6 个，定性比较试验的子样数量不少于 12 个。

2）为制订材料标准和改进设计等提供依据的高可靠性（可靠度在 90% 以上）试验，一般子样数量不少于 16 个。

**6. 试验方案的选择**

1）筛选试验和定性比较试验，建议测定 $P$-$N$（存活率-寿命）曲线。高可靠度试验，一般需测定 $P$-$S$-$N$（存活率-应力-寿命）曲线。

2）测定 $P$-$N$ 曲线：可以进行完全失效试验或定数截尾试验，其截尾数量不大于子样数量的 20%，求得 $P$-$N$ 曲线。

3）测定 $P$-$S$-$N$ 曲线：一般选取 4 ~ 5 级应力水平，在每一应力水平下测定 $P$-$N$ 曲线。根据各应力水平下的 $P$-$N$ 曲线，求得 $P$-$S$-$N$ 曲线。

## 10.3　金属材料旋转弯曲疲劳试验

金属材料旋转弯曲疲劳试验按照 GB/T 4337—2008《金属材料　疲劳试验　旋转弯

曲方法》进行。

## 10. 3. 1　试样

**1. 试验部分的形状**

1）试验部分可以是圆柱形（见图 10-14 ~ 图 10-16）、圆锥形（见图 10-17）和漏斗形（见图 10-18 ~ 图 10-20），每种形状试样的试验部分都应是圆形横截面。

2）试验部分的形状应根据所用试验机的加力方式设计。圆柱形或漏斗形试样可以采用简支梁或悬臂梁一点或两点加力，圆锥形试样只能采用悬臂梁单点加力方式。图 10-14 ~ 图 10-20 为各种方式的原理图，显示了各种情况下的弯矩和名义应力图。

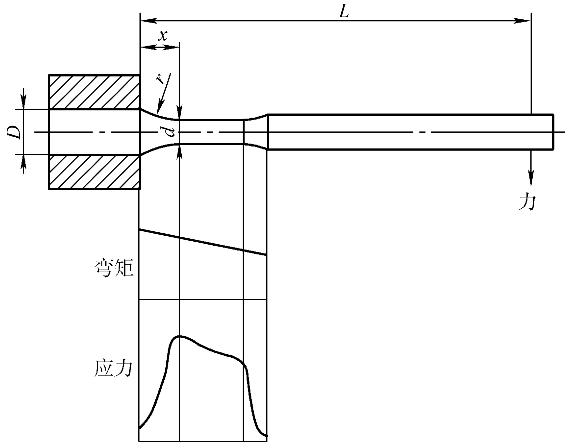



图 10-14　圆柱形试样（单点加力）

*D*—试样夹持端直径（mm）　*L*—力臂（mm）　*x*—最大应力处的力臂（mm）
*d*—试样应力最大处直径（mm）　*r*—试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径（mm）

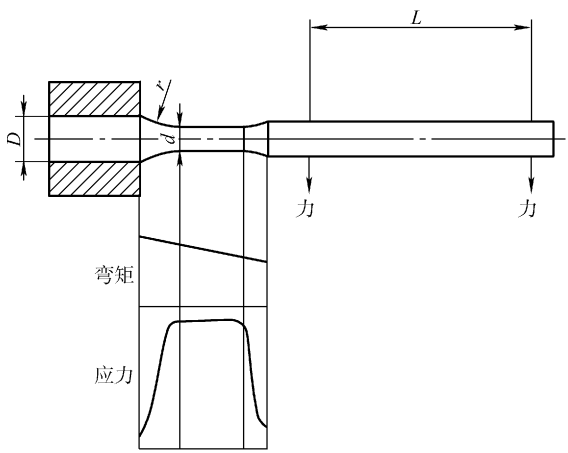



图 10-15　圆柱形试样（两点加力）

*D*—试样夹持端直径（mm）　*L*—力臂（mm）　*d*—试样应力最大处直径（mm）
*r*—试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径（mm）

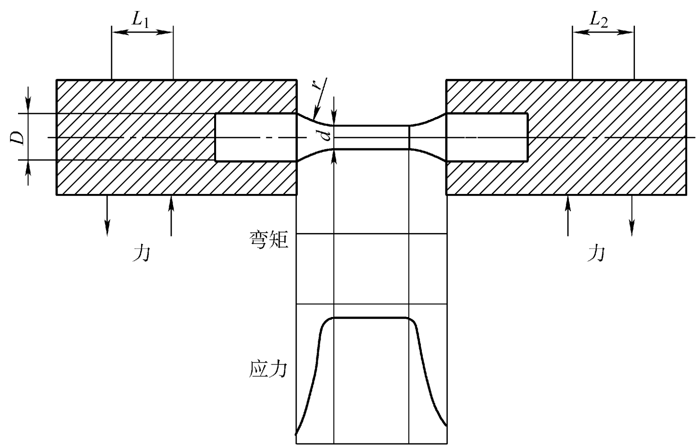



图 10-16　圆柱形试样（四点加力）

$D$—试样夹持端直径（mm）　$L_1$、$L_2$—力臂（mm）　$d$—试样应力最大处直径（mm）

$r$—试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径（mm）

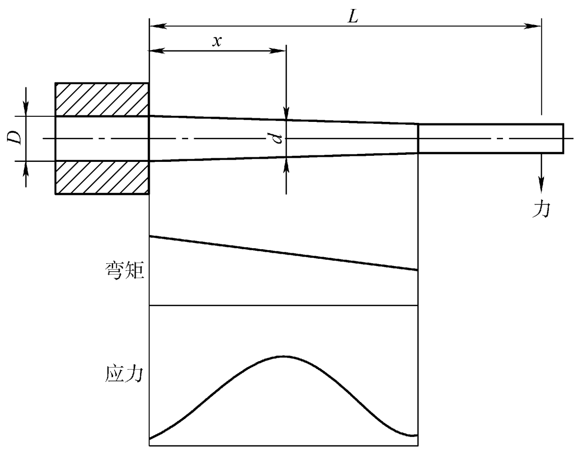



图 10-17　圆锥形试样（单点加力）

$D$—试样夹持端直径（mm）　$L$—力臂（mm）　$d$—试样应力最大处直径（mm）

$x$—最大应力处的力臂（mm）

3）不同类型的试样给出的疲劳试验结果可能不同。一般采用使尽可能多的材料体积承受高应力的试样类型。

4）对于某些材料高应力和高速旋转可能会引起试样发热。如果出现这种情况，应减小试样承受高应力的材料体积。如果采用冷却试样的方式，冷却介质不得与试验材料发生反应。应选取与试样发生最小反应的介质，试验介质应在报告中注明。

**2. 试样尺寸**

1）同一批疲劳试验所使用的试样应具有相同的直径、形状和尺寸公差。

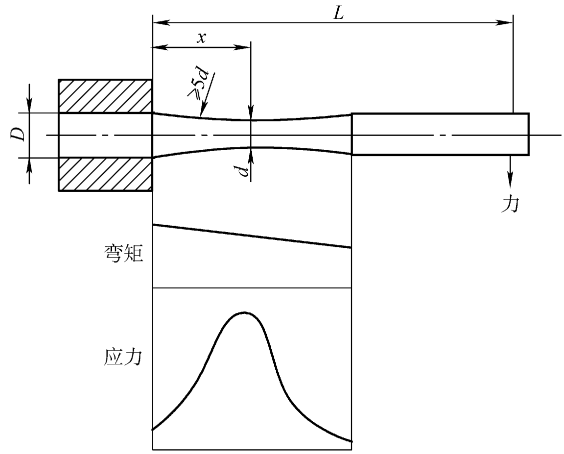



图 10-18　漏斗形试样（单点加力）

D—试样夹持端直径（mm）　L—力臂（mm）　d—试样应力最大处直径（mm）

x—最大应力处的力臂（mm）

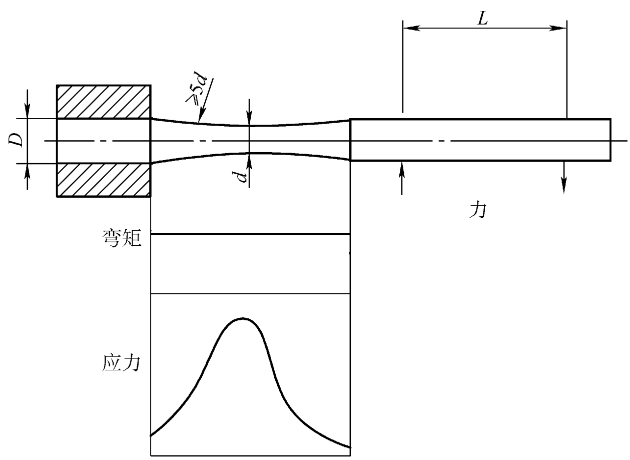



图 10-19　漏斗形试样（两点加力）

D—试样夹持端直径（mm）　L—力臂（mm）　d—试样应力最大处直径（mm）

2）为了准确计算施加的力，每个试样实际最小直径的测量应精确至 0.01mm。试验前测量试样尺寸时应确保不损伤试样表面。

3）对于承受恒定弯曲的圆柱形试样，试验部分的平行度误差应保证在 0.025mm 以内；对于其他形状的圆柱形试样，试验部分的平行度误差应保证在 0.05mm 以内。试样夹持部分与试验部分的过渡圆弧半径应不小于 $3d$。对于漏斗形试样，试验部分的圆弧半径应不小于 $5d$。

4）图 10-21 显示了圆柱形试样的形状和尺寸。一般直径 $d$ 为 6mm、7.5mm 和 9.5mm，直径 $d$ 的偏差为 ±0.05mm。图 10-22 所示为高温疲劳试验圆弧形光滑试样。

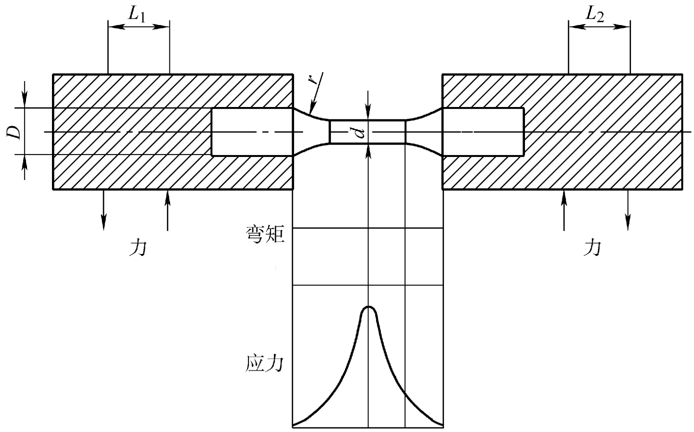



图 10-20　漏斗形试样（四点加力）

$D$—试样夹持端直径（mm）　$L_1$、$L_2$—力臂（mm）　$d$—试样应力最大处直径（mm）

$r$—试样夹持部分与试验部分之间过渡弧半径（mm）

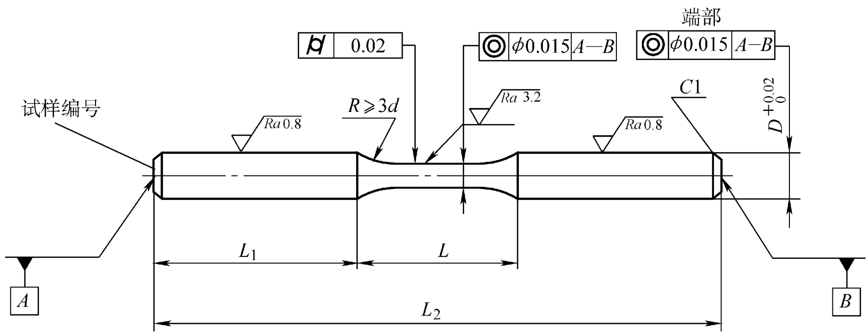



图 10-21　圆柱形光滑试样

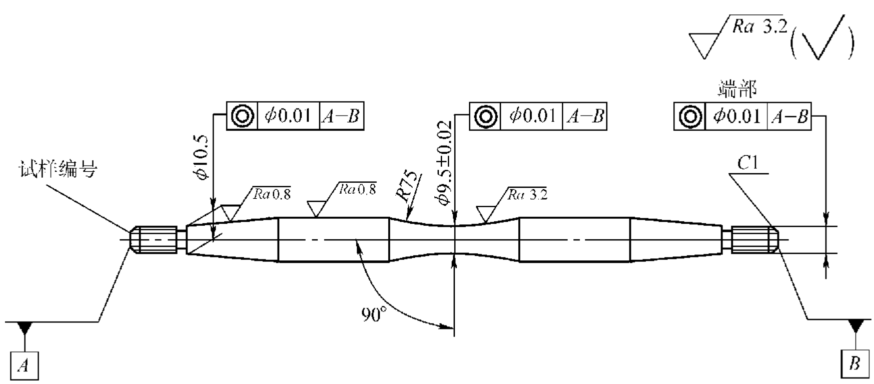



图 10-22　圆弧形光滑试样

5）最小横截面直径一般为 6mm、7.5mm 和 9.5mm，直径的偏差应不大于 0.005$d$。

6）对于螺纹夹持的试样，螺纹部分的横截面积与试验部分的横截面积之比应不小

于3。

**3. 取样和标记**

1）从半成品或零件上取样对试验结果会有影响，因此要在完全了解情况的条件下取样。

2）取样图应附加到试验报告中，应清晰地表明每个试样的位置、半成品产品加工的特征方向（轧制方向、挤压方向等）、每个试样的标识。

3）试样在加工的每个阶段都应有标识，应采取可靠的方法保证加工过程中标识不会消失或影响试验的结果。

**4. 加工过程**

1）机加工可能在试样表面产生残余应力，这些残余应力可能是机加工阶段的热梯度或材料变形或显微结构的变化引起的。残余应力的影响在高温疲劳试验时不需考虑，这是因为残余应力在试样保温过程中已全部或部分释放。因此，应该采取合适的机加工方式来减小残余应力，尤其是在最终抛光阶段。

2）对于较硬的材料，选取磨削和抛光加工工艺最好。试样磨削前的加工余量为 +0.1mm，以不超过0.005mm/r的磨削速度进行磨削。抛光是用颗粒逐渐减小的不同砂纸去除掉最后的0.025mm加工余量。最终的抛光方向应沿着试样轴线。

3）有些材料由于某些元素或化合物的存在而影响力学性能，典型的例子就是氯离子对钢和钛合金的影响。在切削过程中应避免这些元素，应在试样保存之前清洗和脱脂。

**5. 表面状态**

1）试样的表面状态对试验结果有影响，这种影响通常与多种因素有关，包括试样表面粗糙度、表面残余应力的存在、材料显微结构的改变、污染物的引入等。

2）表面状态用平均表面粗糙度或当量值来定量化。在各种试验条件下，试样的平均表面粗糙度 $Ra$ 应小于0.2μm。

3）试样的最终加工要去除所有车削过程中的环向划痕，最终的磨削应是纵向机械抛光。用大约20倍的光学仪器检查试样表面，不允许有环向划痕。

4）如果在粗加工之后进行热处理，应在热处理之后进行最终的抛光。如果不可能，应在真空或惰性气体下进行热处理防止试样的氧化，这种情况下残余应力已得到了释放。热处理的细节和机加工过程应在试验结果中注明。

## 10.3.2　试验设备

**1. 旋转弯曲疲劳试验机**

图10-23所示为主要类型旋转弯曲疲劳试验机的原理图。

1）可使用不同类型的旋转弯曲疲劳试验机，但所施弯矩误差应在±1%以内，选择的频率应适合于材料、试样和试验机的组合。对于给定的试验系列，试验频率应当相同。试验过程中应避免试样振动。

2）试验频率通常为15～200Hz（对应的转速为900r/min到10000r/min），并连续可调。

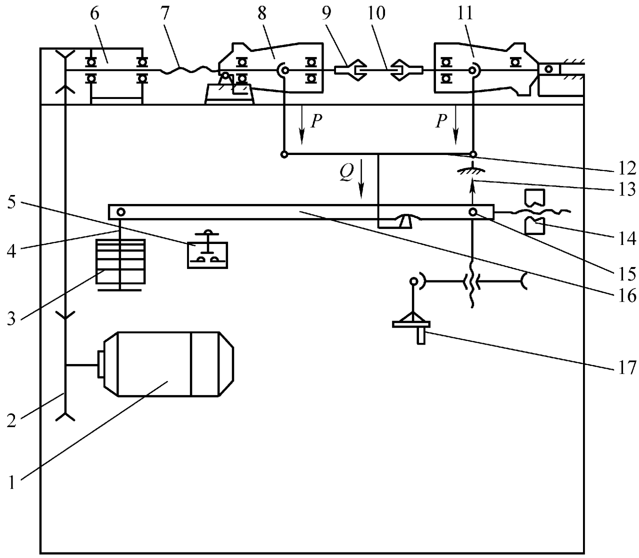



图 10-23　旋转弯曲疲劳试验机的原理图

1—电动机　2—三角带　3—砝码　4—吊杆　5—按钮　6—计数减速器
7—软轴　8—左主轴箱　9—弹簧夹头　10—试样　11—右主轴箱　12—吊钩
13—指针　14—平衡锤　15—计数器　16—标杆　17—手轮

3）高速旋转下的试样可能会发生自热，对疲劳寿命和强度的试验结果产生影响。如果发生此类情况，应降低试验频率。试样温度不应超过试验材料熔点的 30%，并应记录相应温度。

4）如果环境的影响很明显，试验结果可能具有频率依赖性。

**2. 加温装置和温度测量装置**

1）试样用电阻炉等加热装置加热。

2）炉温应保持均匀，试样工作部分应在炉膛长度内，温度梯度不大于 15℃。

3）测量或记录温度所用的热电偶、补偿导线和控温、测温仪表都应定期进行标定。

4）温度显示器的分辨力至少为 0.5℃，温度测量装置的误差应在 ±1℃以内。

## 10.3.3　试验内容及结果表示

**1. 安装试样**

1）安装每个试样时，要避免试验部分承受施加力以外的应力。如果轴承是通过开口销来传递力的，在这种情况下就要求将试样定好位并拧紧，避免起始扭应变的产生。

2）为了避免试验过程中的振动，试样的同轴度和试验机的驱动轴应保持在接近的极限值之内。主轴端的最大允许误差为 ±0.025mm。对于单点或两点加载悬臂试验机自由端的最大允许误差为 ±0.013mm。对于其他类型的旋转弯曲疲劳试验机，实际工作部分两端的径向误差应不大于 ±0.013mm。

**2. 终止试验**

试验一直进行到试样失效或达规定循环次数时终止，如失效位置发生在试样标距以外，则试验结果无效。

**3. 高温试验步骤**

1）当试样用辐射炉加热时，需要控制转动时的试样温度。在疲劳试验中，不能使用直接温度测量方法，允许用间接温度测量方法在静态下标定试验温度。

2）试样加热至规定的试验温度，保温 0.5h。测量试验温度时，可采用间接测量（即热电偶的热端不直接接触试样工作表面，而与其相距 1 ~ 2mm）与直接测量法（即热电偶热端直接接触试样工作表面，此测量必须在试验机停止转动的状态下进行）。间接测量温度的方法用于控制试样温度。

3）在试验过程中，控制炉温的波动范围如表 10-2 所示。

**表 10-2　炉温允许的波动范围**　　（单位：℃）

| 试验温度 | 温度波动 |
|---|---|
| ≤600 | ±3 |
| >600 ~ 900 | ±4 |
| >900 ~ 1200 | ±5 |

4）温度测量装置在室温发生变化时应稳定在 ±1℃。

5）在试验过程中，若短时间内炉温有降低现象，应将炉温降低期间内的循环次数从总循环数中减去。

**4. *S-N*（应力-寿命）曲线的构成**

某些材料的 *S-N* 曲线在给定的循环数显示明显的斜率变化，如曲线的后半段平行

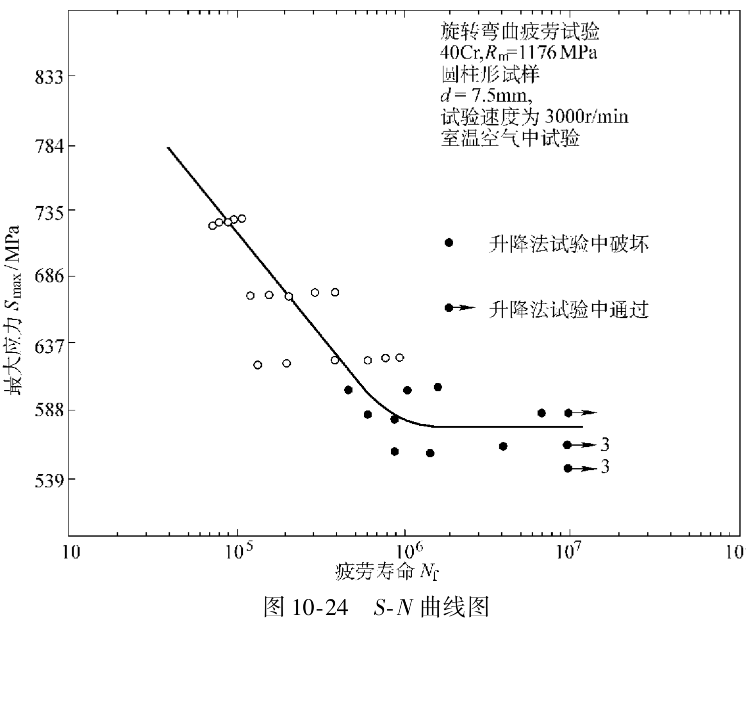



图 10-24　*S-N* 曲线图

于水平轴线。也有一些材料 S-N 曲线呈现连续的曲线，最终趋近于水平轴。对于第一种类型的 S-N 曲线，推荐取 $10^7$ 耐久寿命；对于第二种类型，取 $10^8$ 耐久寿命。特定的循环数应包括在测定的耐久极限应力范围内。

**5. 试验结果的处理**

（1）表格的表达形式　当采用表格的报告格式时，表格内容应包括试样标识、试验顺序、试验应力范围、疲劳寿命或试验结束时的循环数等。

（2）图形表达形式　最普遍的疲劳试验数据的图形表达形式是 S-N 曲线，如图 10-24 所示。以横坐标表示疲劳寿命 $N_f$，以纵坐标表示最大应力，应力范围或应力幅，一般使用线性尺度，也可用对数尺度。用直线或曲线拟合各数据点，即得 S-N 曲线图。

S-N 曲线图上至少应包括材料牌号、材料的级别及拉伸性能、试样的表面状态、缺口试样的应力集中系数、疲劳试验的类型、试验频率、环境和试验温度等。

## 10.4　金属材料疲劳裂纹扩展速率试验

金属材料疲劳裂纹扩展速率试验按照 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》进行。

### 10.4.1　试样

**1. 试样形状**

1）标准 C（T）试样如图 10-25 所示。

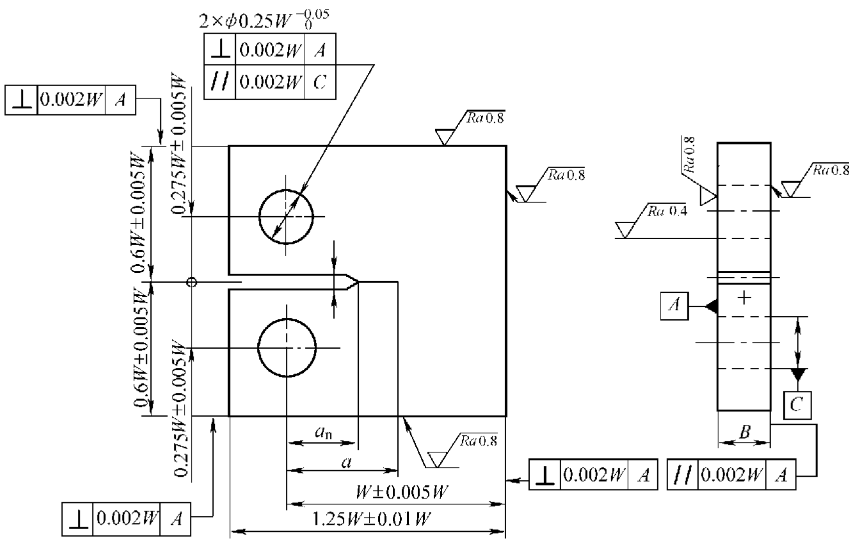



图 10-25　标准 C（T）试样

2）标准 M（T）试样如图 10-26 所示，试样工作长度应满足如下要求：

① 对于拉-拉加力：试样宽度 W 不大于 75mm 时，采用单销加力，加力孔之间的距

离应不小于3$W$。特殊几何形状 M（T）试样的 $W$ 大于75mm 时，采用多排螺栓夹紧，试样两端最里面一排螺钉孔之间的距离应不小于1.7$W$。

② 对于拉-压加力：采用夹板夹紧，夹板内边缘之间的距离 $L$ 应大于或等于1.2$W$。

3）标准 SE（B）试样如图10-27所示，跨距 $S$ 取4$W$。

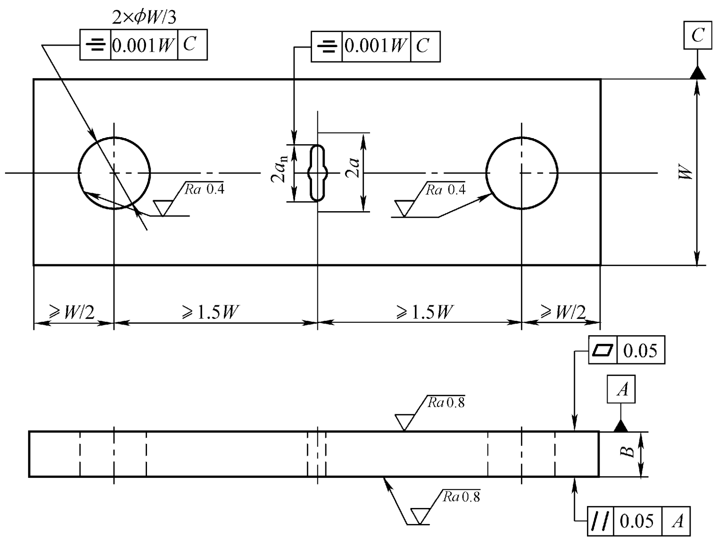



图10-26　$W$ 不大于75mm 的 M（T）试样

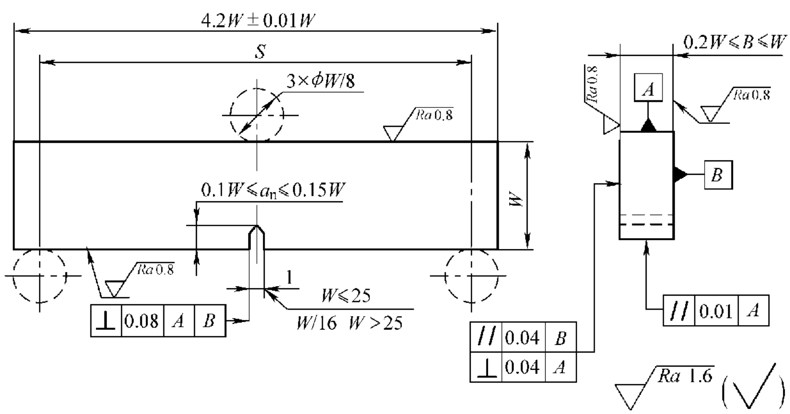



图10-27　标准 SE（B）试样

**2. 试样厚度**（$B$）

1）对于 C（T）试样，推荐试样厚度的范围应满足 $W/20 \leqslant B \leqslant W/4$，$W$ 不小于25mm。

2）对于 M（T）试样，推荐的试样厚度上限为 $W/8$，最小厚度要能避免弯曲，并保证弯曲应变不超过名义应变的5%。

3）对于 SE（B）试样，推荐试样厚度的范围为 $W/5 \leqslant B \leqslant W$。

**3. 试样宽度（$W$）**

1）为测得有效的试验数据，选择试样的最小宽度 $W$。主要根据有：①材料的规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$；②预期的最大应力强度因子的极限值 $K_{maxL}$；③C（T）试样的比值 $a/W$ 或 M（T）试样的比值 $2a/W$ 的极限值。试样尺寸标准化曲线如图 10-28 所示。

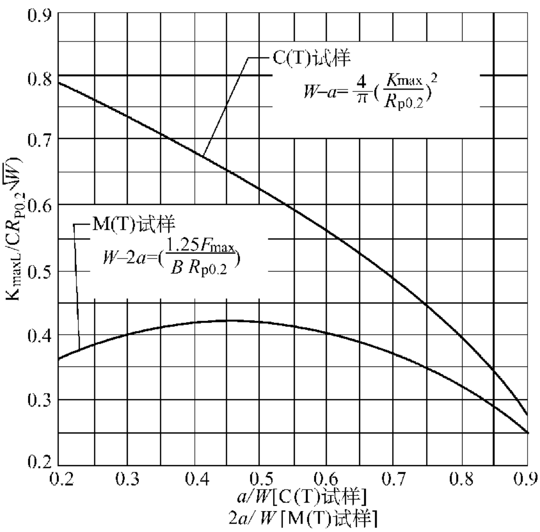



图 10-28　C（T）和 M（T）标准试样尺寸标准化曲线图

2）如果是 C（T）试样，根据对无裂纹韧带最小值的要求按下式绘制图 10-28 中的曲线。

$$W-a=\frac{4}{\pi}\left(\frac{K_{max}}{R_{p0.2}}\right)^2$$

式中　$W-a$——试样无裂纹的韧带区，单位 mm；

$K_{max}$——最大应力强度因子，单位为 $N/mm^{\frac{3}{2}}$；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa。

3）如果是 M（T）试样，根据对无裂纹韧带最小值的要求按下式绘制图 10-28 中的曲线。

$$W-2a=\frac{1.25F_{max}}{BR_{p0.2}}$$

式中　$W-2a$——试样无裂纹的韧带区，单位为 mm；

$F_{max}$——最大力，单位为 N；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa。

4）对于 SE（B）试样的最小宽度 $W$ 的选择可根据规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 以及预期的最大应力强度因子的极限值 $K_{maxL}$ 和比值 $a/W$ 的极限值获得。无裂纹韧带最小值按下式计算：

$$W-a=\left(\frac{12WF_{max}}{2BR_{p0.2}}\right)^{1/2}$$

式中　$W-a$——试样无裂纹的韧带区，单位为 mm；

$F_{max}$——最大力，单位为 N；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$R_{p0.2}$——规定塑性延伸强度，单位为 MPa。

**4. 切口长度**

1）C（T）试样的切口长度 $a_1$ 应不小于 0.2$W$。

2）M（T）试样的切口长度 $a_n$ 应不小于中心孔半径的 3 倍。当采用柔度法测量裂纹长度时，一般中心裂纹长度 $2a_n$ 不小于 0.2$W$。

3）SE（B）试样的切口长度 $a_n$ 应符合 $0.1W\leqslant a_n\leqslant 0.15W$。

**5. 切口制备**

试样切口可通过铣切、线切割和其他方法加工而成。图 10-29 给出了各种不同的切口几何形状。为便于预制出合格的疲劳裂纹，应在热处理后进行线切割加工，切口根部曲率半径 $\rho$ 不大于 0.08mm（在预制出合格的疲劳裂纹的前提下曲率半径 $\rho$ 可以稍大些）；铣切的人字形切口及其他加工的切口形状其根部曲率半径 $\rho$ 不大于 0.25mm。

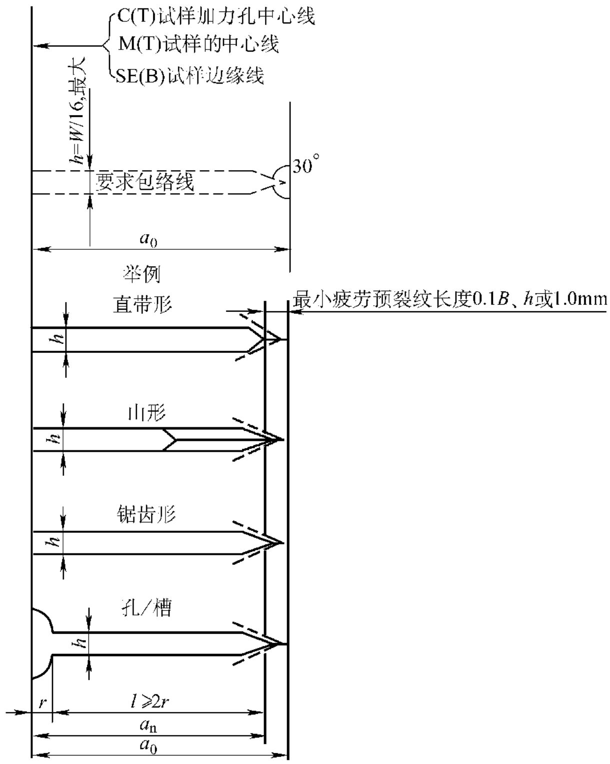



图 10-29　切口详图及最小疲劳预裂纹长度的要求

$a_n$—试样切口长度（mm）

**6. 试样数量**

1）测定应力/应变-寿命曲线时一般需 12 ~ 15 根试样，选取几级应力或应变水平分别测定其失效循环数。

2）在规定的应力或应变值下测定其失效的循环数时，一般不少于 3 根试样。

## 10.4.2　试验设备

**1. 疲劳试验机**

试验允许在不同类型的拉压疲劳试验机上进行，加力系统应有良好的同轴度，使试样受力对称分布，按照 GB/T 16825.2—2005《静力单轴试验机的检验　第 2 部分：拉力蠕变试验机 施加力的检验》在静态下检验力值，最大允许误差为 ±1%，示值变动度不超过 1%；按照 JJG 556—2011《轴向加荷疲劳试验机》在动态下检验力值，最大允许误差为 ±3%。疲劳试验机应带有准确的循环计数装置。

**2. 加力装置**

1）C（T）试样的加力装置为 U 形夹具，按图 10-30 设计。材料的规定塑性延伸强度应大于 980.7MPa。销钉与销孔间隙应设计得使摩擦减至最小。

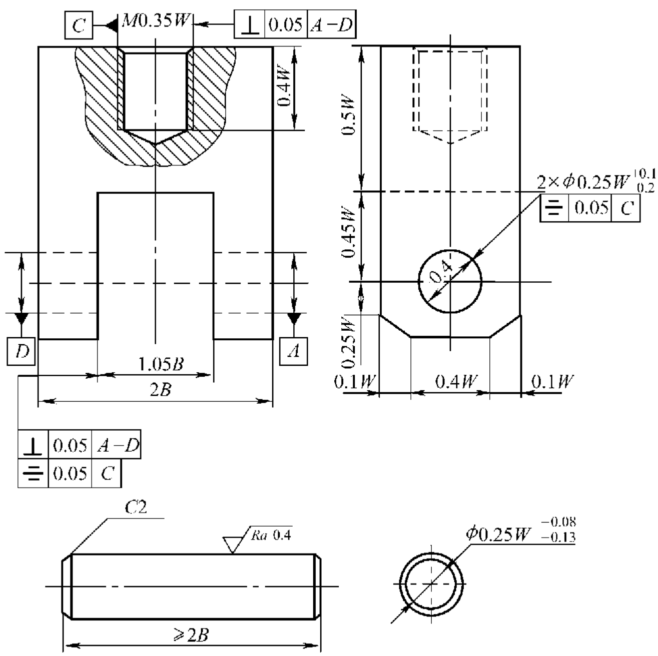



图 10-30　C（T）试样 U 形夹具和销钉图

2）M（T）试样的加力夹具设计应保证在整个试验过程中试样工作区域内应力均匀分布。为限制屈曲，薄板试验必须采用约束导板。夹具夹紧形式随试样宽度和加力条件的变化而变化。对于拉-拉加力，宽度 $W$ 不大于 75mm 时，可采用单销夹紧或平板液压夹具夹紧；宽度 $W$ 大于 75mm 时，采用多排螺栓夹紧或平板液压夹具夹紧。对于拉-

压加力，采用压板夹紧，夹紧力也可由液压和机械楔形系统提供。

3）SE（B）试样的三点弯曲加力线和支承线的圆柱直径取 $W/8$，跨距 $S$ 取 $4W$，圆柱与试样的接触应设计得使摩擦减至最小。

### 10.4.3　试验内容及结果表示

**1. 试样尺寸测量**

1）用最小分度值不大于 0.01mm 的量具在试样的韧带区域三点处测量厚度 $B$，取算术平均值。

2）用最小分度值不大于 $0.001W$ 的量具在试样的裂纹所在截面附近测量宽度 $W$。

**2. 预制疲劳裂纹**

（1）加力　预制疲劳裂纹的加力要求如下：

1）预制疲劳裂纹时应使最大力 $F_{max}$ 的误差控制在 ±5% 以内。

2）预制疲劳裂纹最后一级的最大力值不超过开始记录试验数据时的最大力值。

3）为减少预制疲劳裂纹所用时间，可以先用比试验最大力值较高的力产生疲劳裂纹，但必须把较高的力分级降到试验最大力值，每级下降率不大于 20%。

（2）长度　预制疲劳裂纹长度的要求如下：

1）在前后表面上从切口顶端到疲劳裂纹尖端测量裂纹长度，准确到 ±0.1mm 或 $\pm 0.002W$ 中较大者，所测各个裂纹长度均应大于 $0.1B$ 和切口宽度 $h$，但不得小于 1mm（$W > 127$mm 的试样，测量裂纹长度准确到 0.25mm 以内）。

2）若前后表面裂纹长度测量值之差超过 $0.25B$，或左右两侧裂纹长度测量值之差（取前后表面的算术平均值）超过 $0.025W$，则预制裂纹无效。

**3. 疲劳裂纹扩展试验**

1）应保持力稳定，并避免力过载引起的迟滞效应。

2）当存在环境影响时，必须考虑加力水平、频率和波形的影响。

3）若长时间中断试验，而中断后的裂纹扩展速率比中断前小，则试验无效。

4）若试验中任何一点平均穿透疲劳裂纹与试样对称平面的最大偏离超过 ±10°，则此点数据无效。

5）若在试验中某一点处前后表面裂纹长度测量值之差超过 $0.25B$，或左右两侧裂纹长度测量值之差（取前后表面的算术平均值）大于 $0.025W$，则此点数据无效。

6）用目测法测量裂纹长度时，应将裂纹长度 $a$ 与循环数 $N$ 的记录值随时标在坐标纸上。

**4. 裂纹长度测量**

1）用目测法或等效的方法测量疲劳裂纹长度，测量准确到 ±0.1mm 或 $\pm 0.002W$ 中较大者（$W > 127$mm 的试样，测量裂纹长度应准确到 0.25mm 以内）。

2）测量裂纹长度最好在不中断试验的情况下进行。若需中断试验测量时，中断时间应减至最少，为增加裂纹尖端清晰度，可加静力，其值应小于最大试验力。

3）裂纹增量 $\Delta a$ 的测量间隔应使各数据点接近均匀分布。测量裂纹增量间隔如表 10-3 所示。

表 10-3　测量裂纹增量间隔

| 试样类型 | 测量范围 | 裂纹增量 $\Delta a \leqslant$ |
|---|---|---|
| C(T)试样和 SE(B)试样 | $0.25 \leqslant a/W \leqslant 0.40$ | 0.04$W$ |
| | $0.40 < a/W \leqslant 0.60$ | 0.02$W$ |
| | $a/W > 0.60$ | 0.01$W$ |
| M(T)试样 | $2a/W \leqslant 0.60$ | 0.03$W$ |
| | $2a/W > 0.60$ | 0.02$W$ |

4）在任何情况下，最小的 $\Delta a$ 应不小于 0.25mm。

5）用目测法测量裂纹长度：当比值 $B/W$ 小于 0.15 时，C（T）试样和 SE（B）试样只需在一个表面上测量裂纹长度，M（T）试样需在左右两侧测量裂纹长度，取算术平均值；当比值 $B/W$ 大于或等于 0.15 时，C（T）试样和 SE（B）试样需在前后两个表面上测量裂纹长度，取算术平均值，M（T）试样则需在前后表面的左右两侧测量四个裂纹长度，取算术平均值。

**5. 试验结果的处理**

（1）裂纹曲率的修正　包括以下内容：

1）试验结束之后检验断口，以确定裂纹前缘曲率范围。若需要进行曲率修正且裂纹前缘线条明显，则至少在两个位置（例如预制裂纹和极限裂纹）测量沿厚度方向 $B/4$、$B/2$、$3B/4$ 三点处的裂纹长度，其算术平均值（平均裂纹长度）与试验记录的相应裂纹长度之差即为曲率修正量。

2）在任何一个位置上，若由断口测量的平均裂纹长度计算出的应力强度因子和由试验测量的平均裂纹长度计算出的应力强度因子相差大于5%，则需进行曲率修正。

3）裂纹曲率修正量不是一个恒量，当它随裂纹伸长而单调增加或减少时，则采用线性内插法修正中间各数据点。

（2）疲劳裂纹扩展速率的确定　按以下方法进行：

采用拟合 $a$-$N$（裂纹长度-循环数）曲线求导的方法确定疲劳裂纹扩展速率，可用割线法和递增多项式法进行，参见 GB/T 6398－2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》。

（3）应力强度因子范围的计算　按以下方法进行：

1）对于 C（T）试样，按下式计算：

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{B\sqrt{W}} \times \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}}(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

式中　$\Delta K$——应力强度因子范围，单位为 $\mathrm{N/mm^{\frac{3}{2}}}$；

$\Delta F$——力值范围，单位为 N；

$B$——试样厚度，单位为 mm；

$W$——试样宽度，单位为 mm；

$\alpha$——$\alpha = a/W$；

$a$——计算裂纹长度，单位为 mm。

2）对于 M（T）试样，按下式计算：

$$\Delta K=\frac{\Delta F}{B}\sqrt{\frac{\pi\alpha}{2W}\sec\frac{\pi\alpha}{2}}$$

式中　$\Delta F$——$\Delta F=F_{max}-F_{min}$（$R\geqslant0$）；$\Delta F=F_{max}$（$R<0$）；

$\alpha$——$\alpha=2a/W$。

3）对于 SE（B）试样（跨距 $S$ 取 $4W$），按下式计算：

$$\Delta K=\frac{\Delta F}{BW^{1/2}}\left[\frac{6\alpha^{1/2}}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}\right][1.99-\alpha(1-\alpha)(2.15-3.93\alpha+2.7\alpha^2)]$$

式中　$\alpha$——$\alpha=a/W$。

## 10.5　金属材料轴向等幅低循环疲劳试验

金属材料轴向等幅低循环疲劳试验按照 GB/T 15248—2008《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》进行。

金属材料轴向等辐低循环疲劳试验常用术语如下：

（1）应力/应变-寿命曲线　一般是用一组试样，选取若干个应力或应变值，分别测定其到达失效的循环数，然后画出 $\Delta\sigma/2$-$2N_f$ 或 $\Delta\varepsilon_t/2$-$2N_f$ 曲线（$\Delta\sigma$ 是循环应力范围，$N_f$ 是失效循环数，$\varepsilon_t$ 是总应变范围），如图 10-31 和图 10-32 所示。根据关系式 $\Delta\varepsilon_t=\Delta\varepsilon_e+\Delta\varepsilon_p$（$\Delta\varepsilon_e$ 是弹性应变范围，$\Delta\varepsilon_p$ 是塑性应变范围），$\Delta\varepsilon_t/2$-$2N_f$ 曲线还可处理成图 10-33 形式。

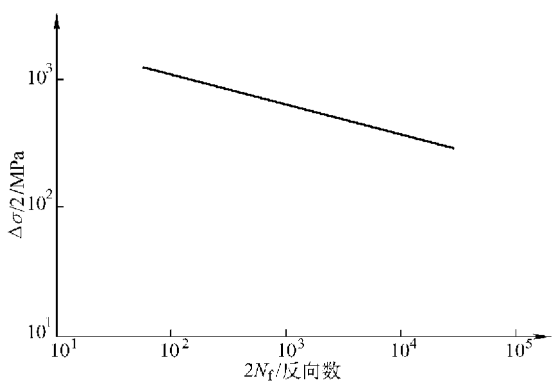



图 10-31　$\Delta\sigma/2$-$2N_f$ 曲线

（2）应力-应变迟滞回线　一次循环中的应力-应变关系曲线，如图 10-34 所示。

（3）循环应力-应变曲线　在不同总应变范围下得到的一系列稳定迟滞回线顶点的轨迹，如图 10-35 所示。也可用稳定应力幅和塑性应变幅在双对数坐标上绘出的关系曲线表示，如图 10-36 所示。

（4）循环硬化　在循环加载过程中，当控制应变恒定时，其应力随循环数增加而增加然后渐趋稳定的现象。

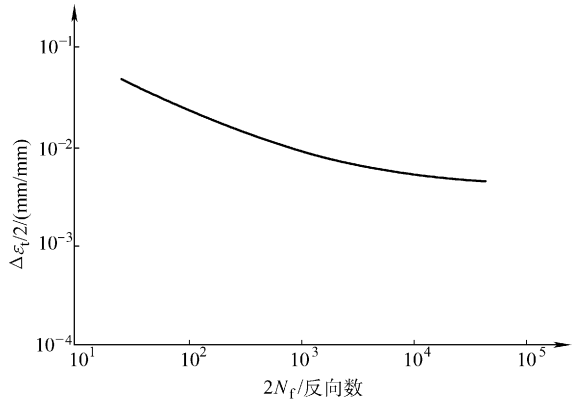



图 10-32　$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_t/2$-$2N_f$ 曲线

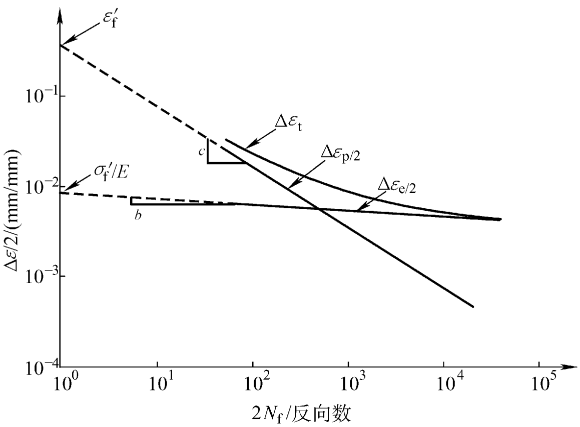



图 10-33　$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_t = \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_e + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 状态 $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_t/2$-$2N_f$ 曲线

$\varepsilon_f'$—疲劳延性系数　$\sigma_f'$—疲劳强度系数

$E$—弹性模量　$c$—疲劳延性指数　$b$—疲劳强度指数

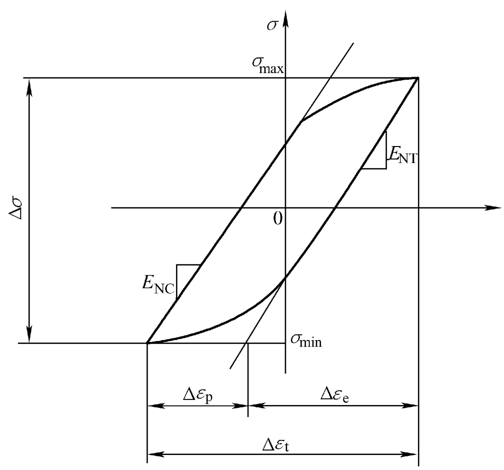



图 10-34　应力-应变迟滞回线

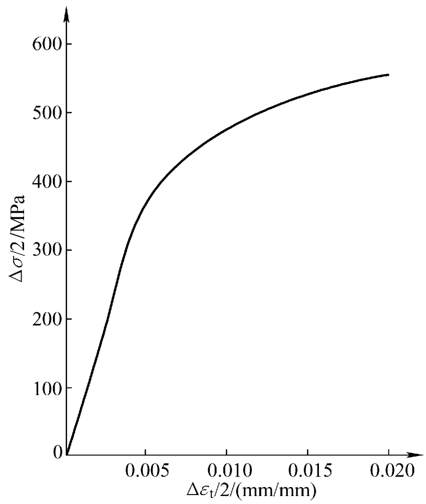



图 10-35　循环应力-应变曲线

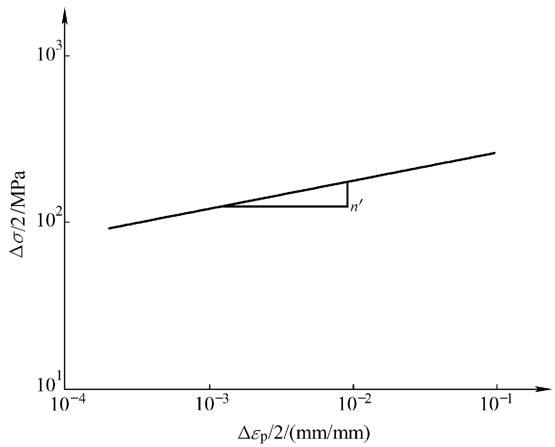



图 10-36　$\Delta\sigma/2$-$\Delta\varepsilon_p/2$ 曲线

（5）循环软化　在循环加载过程中，当控制应变恒定时，应力随循环数的增加而降低然后渐趋稳定的现象。

## 10.5.1　试样

### 1. 圆形截面试样

1）圆形截面试样有等截面试样和漏斗形试样。等截面试样如图 10-37a 所示，工程测试中用得最多，通常用于 2% 以内的总应变范围的试验。漏斗形试样如图 10-37b 所示，选用时应根据材料的各向异性和抗弯性确定，通常用于大于 2% 总应变的总应变范围的试验，其曲率半径与试样最小半径之比一般为 12∶1。

2）当材料是各向异性时，应采用等截面试样。

3）试样工作部分的最小直径为 5mm。

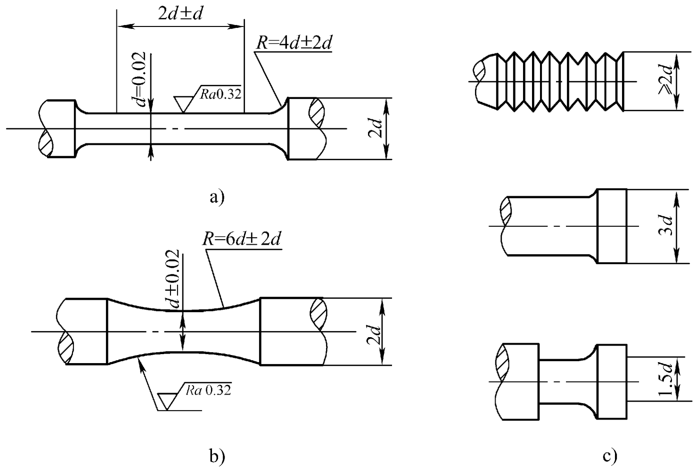



图 10-37　低循环疲劳试样

a）等截面试样　b）漏斗形试样　c）夹持部位的形状和尺寸

**2. 板材试样**

低循环疲劳板材试样的板厚小于 6mm 时，可采用图 10-38 所示的试样，但必须有特殊夹持装置。矩形截面试样适合于 2. 5mm 的板厚、施加 1% 的总应变幅值，如图 10-38a 所示。对于较高的应变幅值，一般采用图 10-38b 所示的圆形截面漏斗形试样。

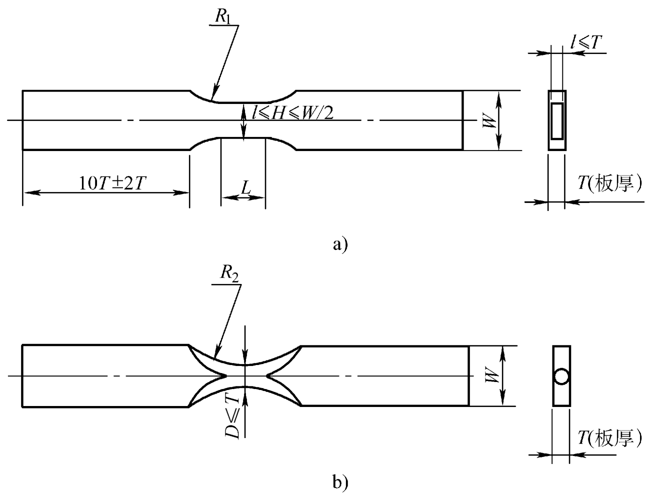



图 10-38　低循环疲劳板材试样

a）矩形截面试样　b）圆形截面试样

**3. 非标准试样**

非标准试样也可设计成管状试样或直径小于 5mm 的圆形截面试样。轴向应变控制等截面试样的标距长度与工作部分直径之比不大于 4，试样夹持部分的截面积与工作部分截面积之比不小于 4，试样工作部分与夹持部分的同轴度误差应在 0. 01mm 以内。

## 10.5.2　试验设备

**1. 试验机**

1）使用能控制载荷和变形的拉-压低循环疲劳试验机。

2）试验机的静载荷按 JJG 556—2011《轴向加荷疲劳试验机》进行定期检定，其系统误差不大于 ±1%，偏差不大于 1%。若误差达 ±2% 时仍可使用，但必须做出校正曲线并加以修正。误差超过 ±2% 时，不允许使用。

3）相继两循环的重复性应在所试应力或应变范围的 1% 以内，或平均范围的 0.5% 以内，整个试验过程应稳定在 2% 以内。

**2. 夹具**

1）连接试样的夹头可采用任何形式，如螺纹或带台肩等，但试验时试样与夹头和试验机的连接应紧固，以免载荷换向时试样与夹头松动或造成间隙。

2）高温试验时应对夹具进行冷却，可防止载荷链中的其他元件受到损坏。

3）应具有良好的同轴度。

**3. 应变引伸计**

1）应变引伸计应适合于长时间内动态测量和控制。测量试样标距长度内的变形时，测量精度应不大于 ±1%。

2）应变引伸计常采用电机械式和光电式，可根据所用试样选取轴向应变引伸计（见图 10-39）或径向应变引伸计（见图 10-40）。

3）每次试验后，引伸计应进行标定。

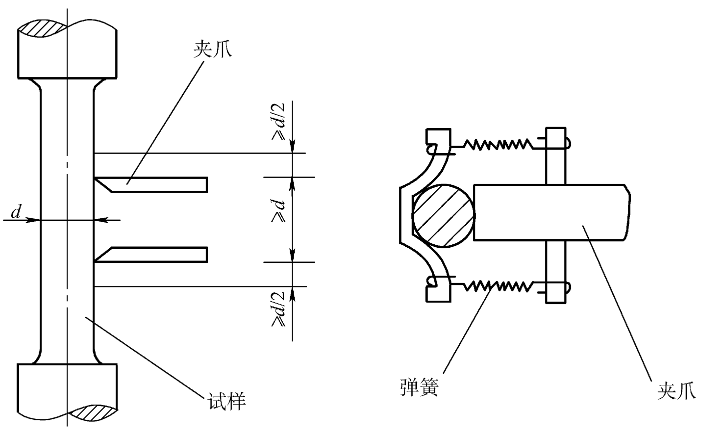



图 10-39　轴向应变引伸计

**4. 数据采集与记录系统**

1）数据记录的准确度应保持在满量程的 1% 以内。

2）用计算机数据采集系统对载荷、变形及循环次数等试验数据进行采集和存储。数据采集的频率应满足清楚记录应力-应变迟滞回线的需要，采集和存储的数据可随时绘制曲线或传输至打印机。

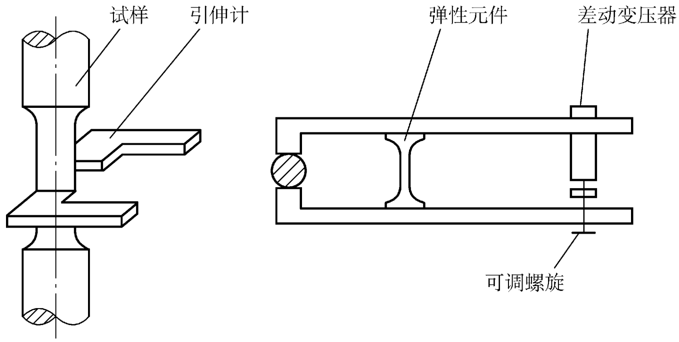



图 10-40　径向应变引伸计

3）在条件不具备时，可使用 $X$-$Y$ 记录仪或带照相功能的示波器记录载荷-变形或应力-应变迟滞回线；使用循环计数器记录总的循环数，并附带一计时器，以便对循环计数器和频率进行检验。

4）使用漏斗形试样进行径向应变控制的低循环疲劳试验时，试验采集的是径向应变信号，一般使用应变计算机将径向应变和轴向应力转换成轴向应变。

## 10.5.3　试验内容及结果表示

**1. 试验环境**

1）室温试验时，应对温度进行检测和记录，超出 10 ~ 35℃范围的温度应在报告中说明。

2）高温试验时，试样工作部分的温度波动应不大于 ±2℃，标距长度内的温度梯度应在 ±2℃或试验温度的 1%（两者取较大值）以内，否则应在报告中说明。

3）高温试验可采用高频感应炉、辐射炉或电炉加热。为使试样温度均匀，应有足够的保温时间。使用前两种方法时，应在炉子和试样之间设一个均热屏。

4）在空气中进行试验时，应对湿度进行控制。

**2. 试样尺寸的测量**

为准确计算试样的横截面积，应采用读数精度不低于 0.01mm 的测量仪器来测量试样尺寸。对于等截面试样，应在标距长度内至少两个不同位置进行直径测量。

**3. 试验机的控制**

1）根据试验目的，试验时可以控制一个或几个变量，并同时监测其他变量随循环的变化。

2）低循环疲劳试验中，一般控制总应变范围。根据试验要求也可控制非弹性应变范围。对于低延性材料和较长寿命的低循环疲劳试验，非弹性应变范围很小。若既能保持所要求的应变范围，又能对其载荷范围进行定期调整时，允许控制载荷。

3）为了实现能连续控制所规定的试验变量，一般采用闭环控制疲劳试验机。若使用非连续可控的闭环试验机，则应严格控制所用变量的极限。

4）对于各向异性材料，如定向凝固、单晶材料等，应采用轴向应变控制。

5）除试验目的是研究起始加载效应外，所有试验应从相同的拉伸或压缩半循环开始。

**4. 波形**

1）除试验目的是测定波形的影响外，在整个试验过程中应变或应力对时间波形应保持一致。在无特定要求或设备受限制时，一般采用三角波。

2）带保持时间的高温低循环疲劳试验采用梯形波。

**5. 应变速率或循环频率**

1）除试验目的是测定应变速率或循环频率的影响外，对于每个试验，其应变速率或循环频率应保持不变。

2）若因为设备的限制使用非三角波，不能进行恒定的应变速率试验，或者由于时间的限制不能进行恒频率试验时，则可采用其他的速率控制方法。通常采用恒定的平均应变速率（应变范围和频率乘积的两倍）。当试验采用非弹性应变控制时，最合适的方法是保持平均非弹性应变速率恒定。

3）选用的应变速率或频率应足够低，以确保试样温度升高不超过2℃。

**6. 记录**

若使用计算机数据采集系统，应按适当的间隔（如1，2，5，10，20等）连续记录循环应力-应变数据。若无计算机数据采集系统，可使用 $X$-$Y$ 记录仪记录应力-应变迟滞回线。对于循环数超过100的试验可进行间断记录或抽样，除记录最初的迟滞回线外还应至少记录10个迟滞回线。

**7. 失效判定**

1）试样断裂。

2）最大载荷或应力或拉伸卸载弹性模量降低一定的百分数。

3）试样表面出现可检测裂纹，此裂纹增长到符合试验目的要求的预定尺寸。

4）拉伸卸载弹性模量 $E_{NT}$ 与压缩卸载弹性模量 $E_{NC}$ 的比值 $q_N$ 降低至首个循环的50%。

5）迟滞回线的压缩部分出现拐点，拐点的数值 $\sigma_c$，即峰值压缩应力减去压缩加载曲线拐点处的应力，达到峰值压缩应力的某一规定百分数，如图10-41所示。

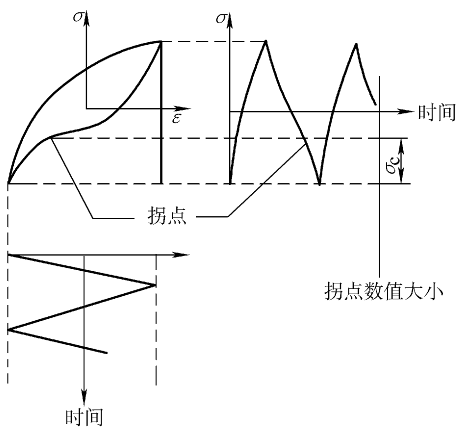



图10-41　确定失效拐点的定义

**8. 有效性判定**

等截面试样断在标距长度内或漏斗形试样断在最小直径附近方为有效。若断在其他位置或在断口上发现有杂质、孔洞或机加工缺陷等情况，则结果无效。若试样总断在同一位置，则可能是同轴度问题或引伸计安装造成的“刀口”断裂，应立即纠正。

**9. 试验结果的处理**

1）绘制出 $\Delta\sigma/2\text{-}2N_f$、$\Delta\varepsilon/2\text{-}2N_f$、$\Delta\varepsilon_e/2\text{-}2N_f$、$\Delta\varepsilon_p/2\text{-}2N_f$ 曲线，最常用的是双对数坐标。

数据处理时，采用循环弹性模量 $E^*$ 进行计算，$E^*$ 按下式计算：

$$E^* = \frac{E_{NT} + E_{NC}}{2}$$

式中　$E^*$——循环弹性模量，单位为 MPa；

$E_{NT}$——拉伸卸载模量，单位为 MPa；

$E_{NC}$——压缩卸载模量，单位为 MPa。

2）根据所绘制的曲线，计算出金属材料在所试条件下的疲劳延性指数、疲劳强度指数、疲劳延性系数和疲劳强度系数。

## 10.6　软质泡沫材料疲劳试验

软质泡沫材料疲劳试验按照 QB/T 2819—2006《软质泡沫材料长期疲劳性能的测定》进行。

### 10.6.1　试样

**1. 试样形状和尺寸**

试样应是很规整的平行六面体，边长为 380mm ± 20mm，厚度为 50mm ± 2mm。试样的形状和尺寸也可按供需双方要求商定。

**2. 试样的取向**

如果试样的泡孔结构具有方向性，则压陷力所施加的方向应由供需双方协商，通常试验时的压陷方向应与产品实际使用时的受力方向相同。

**3. 试样数量**

应进行 3 个试样的测定。

**4. 状态调节**

材料应在生产出 72h 后进行试验。另外，在产品生产出 16h 或 48h 后，如果能确定产品的压缩应力应变特性与生产出 72h 后所测得结果的差别不超过 ±10%，则也可允许在生产出 16h 或 48h 后进行试验。

试验前，试样应在没有形变和没有弯曲的条件下，在下列任何一种环境中进行状态调节 16h 以上：

1）23℃ ±2℃，相对湿度 50% ±5%。

2）27℃ ±2℃，相对湿度 65% ±5%。

## 10.6.2 试验设备

**1. 支撑板**

支撑板能完全承载试样，面积大于试样，板上开有直径 6mm 的孔，孔间距为 20mm，以便空气从试样下面排出。

**2. 压头**

压头直径为 250mm ±1mm，底部边缘有 25mm ±1mm 的倒圆。该装置在每一压陷循环过程中所提供最大负荷能过到 750N ±20N。压头应紧固于导向装置，表面平滑但不抛光。

用曲柄或其他合适的机械装置，使压头和试样能够在试样承载板和压头支架间以 70 次/min ±5 次/min 的频率相对运动，运动的振幅应可以调节。

**3. 压头支架**

试验中当支架和支撑板最接近时，压头全部重量由试样承担，此外的时间，压头的重量由支架承受。压头应能空挂于支撑架上，以防止试样的超负荷承载。应提供方法，在每次循环过程中控制由压头施加的满负荷的时间。这一时间不能超过每一循环持续时间的 25%。

**4. 负荷测定装置**

手动调节时压头附着在轴的下端，此轴通过一个垂直于支撑板和位于其上方的限位装置来支撑试样。在每次循环过程中，当压头的全部重量由试样支撑时，通过调节压头相对于支撑板的垂直位置，来控制压头施加的满负荷的时间。图 10-42 所示为手动调节装置示意图，图 10-43 所示为自动调节装置示意图。每次循环中，用时间直接控制试样满负荷的承载时间。

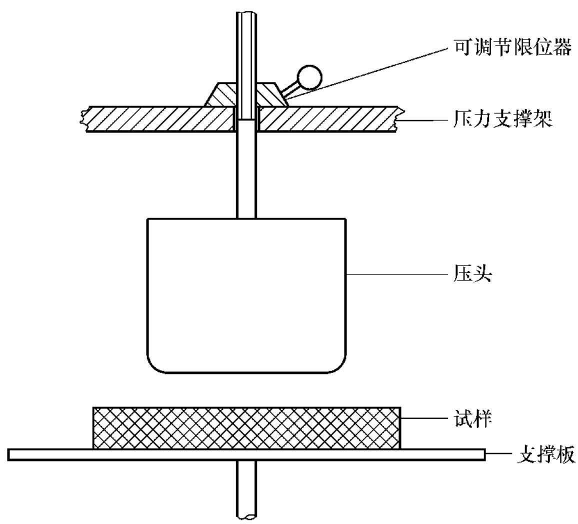



图 10-42 手动调节装置示意图

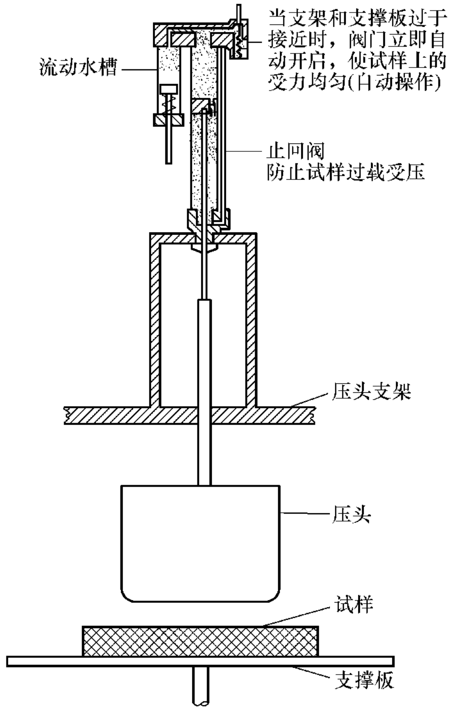



图 10-43　自动调节装置示意图

## 10.6.3　试验内容及结果表示

**1. 试验步骤**

1）按 GB/T 10807 测定其中一个试样的初始厚度 $d_1$，然后按测定此试样初始的 40% ±1% 压陷硬度指数 $H_1$。

2）将试样放在压头正下方的中心位置，调整行程零点使其等于试样的厚度，然后再调整压头和支撑板间的相对位置，以确保能够施加所规定的 750N ±20N 的压力。同时，也需要对压头的质量进行调整。

3）在试验过程中，当泡沫逐渐变软后，如果没有自动调节装置，就必须经常用手动调节以确保压头在压陷试验负荷达到 750N ±20N 后返回。

4）试验机试验循环 80000 次，然后移去试样，并让试样在自由状态下恢复 10min ±0.5min。

5）按 GB/T 10807 测定试样的最终厚度 $d_2$，后按测定此试样最终的 40% ±1% 压陷硬度指数 $H_2$。

6）以初始厚度和初始压陷硬度指数的测定为起点，重复循环以上整个过程，测定另外两个试样。

**2. 结果表示**

1）厚度损失百分数按下式计算：

$$\Delta d = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100\%$$

式中　$\Delta d$——试样的厚度损失（%）；

$d_1$——试样的初始厚度，单位为 mm；

$d_2$——试样的最终厚度，单位为 mm。

2）硬度损失按下式计算：

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

式中　$\Delta H$——试样的硬度损失，单位为 N；

$H_1$——试样的初始硬度指数，单位为 N；

$H_2$——试样的最终硬度指数，单位为 N。

# 参 考 文 献


[1] 刘鸣放，刘胜新. 金属材料力学性能手册［M］. 北京：机械工业出版社，2011.
[2] 桂立丰，曹用涛. 机械工程材料测试手册：力学卷［M］. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2001.
[3] 刘鸿文. 材料力学实验［M］. 北京：高等教育出版社，2006.
[4] 张明. 力学测试技术基础［M］. 北京：国防工业出版社，2008.
[5] 束德林. 工程材料力学性能［M］. 2 版. 北京：机械工业出版社，2007.

◎ 本书从工业生产实际出发，以现行的最新标准资料为依据，全面系统地介绍了材料的拉伸性能、硬度、冲击性能、扭转性能、剪切性能、压缩性能、弯曲性能、断裂性能、疲劳性能测试方法。

◎ 本书每一章节的结构按照实际测试过程中的程序（包括试样制备、试验仪器设备要求、试验环境、试验详细步骤、试验过程中的操作技巧及注意事项、试验数据处理及误差的控制等）进行编写，读者查阅快捷、使用方便，具有极强的实用性。

◎ 本书有选择地给出了部分试验的多种测试方法，包括公式法、图像法、静态法、动态法等，便于读者根据实际工作中的要求和具备的试验条件进行选择。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术／机械工程／测试技术
ISBN 978-7-111-45532-5
策划编辑◎陈保华 ／封面设计◎陈沛

ISBN 978-7-111-45532-5
9 787111 455325
定价：109.00元